



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE DO PARANÁ
CAMPUS LUIZ MENEGHEL
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

LETÍCIA APARECIDA RONQUI FERREIRA

MANEJO DA FERTILIZAÇÃO NITROGENADA E DO INIBIDOR DE UREASE
NBPT NA CULTURA DO TRIGO

BANDEIRANTES, PR, BRASIL

2021

LETÍCIA APARECIDA RONQUI FERREIRA

**MANEJO DA FERTILIZAÇÃO NITROGENADA E DO INIBIDOR DE UREASE
NBPT NA CULTURA DO TRIGO**

Dissertação apresentada ao Programa de
Mestrado em Agronomia, da Universidade
Estadual do Norte do Paraná, *Campus* Luiz
Meneghel.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Ricardo Silva
Coorientador: Prof. Dr. Oriel Tiago Kölln

BANDEIRANTES, PR, BRASIL

2021

Ficha catalográfica elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UENP

FL648m Ferreira, Leticia Aparecida Ronqui
 MANEJO DA FERTILIZAÇÃO NITROGENADA E DO INIBIDOR
 DE UREASE NBPT NA CULTURA DO TRIGO / Leticia
 Aparecida Ronqui Ferreira; orientador Sérgio Ricardo
 Silva; co-orientador Oriel Tiago Kölln -
 Bandeirantes, 2021.
 107 p. :il.

 Dissertação (Mestrado Acadêmico Agronomia) -
 Universidade Estadual do Norte do Paraná, Centro de
 Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em
 Agronomia, 2021.

 1. Triticum aestivum L. . 2. N-(n-butil)
 tiofosfórico triamida. 3. Ureia. 4. Nitrato de amônio.
 5. Eficiência de utilização de nitrogênio. I. Silva,
 Sérgio Ricardo, orient. II. Kölln, Oriel Tiago, co
 orient. III. Título.

LETÍCIA APARECIDA RONQUI FERREIRA

**MANEJO DA FERTILIZAÇÃO NITROGENADA E DO INIBIDOR DE UREASE
NBPT NA CULTURA DO TRIGO**

Dissertação apresentada ao Programa de
Mestrado em Agronomia, da Universidade
Estadual do Norte do Paraná, Campus Luiz
Meneghel.

Aprovada em 30/03/2021

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Sérgio Ricardo Silva – Embrapa Trigo

Prof. Dr. Rafael Otto – Esalq/USP

Prof. Dr. Leopoldo Sussumu Matsumoto – UENP



Prof. Dr. Sérgio Ricardo Silva
Orientador
Embrapa Trigo

DEDICATÓRIA

À Deus e à minha família,
bases da minha formação e de tudo o que sou.

AGRADECIMENTOS

A Deus, toda honra e toda glória. “Até aqui o Senhor nos ajudou”.

Ao meu orientador, Dr. Sérgio Ricardo Silva, por todo tempo dedicado a este trabalho, pelas instruções a mim direcionadas e por compartilhar seu conhecimento.

Ao meu coorientador, Dr. Oriel Tiago Kölln, por atender minhas solicitações sempre que necessário e pela disponibilidade em ajudar.

Aos professores membros das bancas de qualificação e de defesa de Mestrado: Dr. Leopoldo Sussumu Matsumoto, Dr. Rone Batista de Oliveira e Dr. Rafael Otto, pelas importantes contribuições para a melhoria da Dissertação.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, em especial ao pesquisador Dr. Manoel Carlos Bassoi e ao técnico agrícola Fernando Portugal (Embrapa Soja) pela disponibilização de infraestrutura e pela realização dos experimentos de campo. Ao pesquisador Dr. Sirio Wiethölter e à analista Marisa Dahmer pela realização das análises químicas no Laboratório de Fertilidade de Solos e Nutrição de Plantas da Embrapa Trigo. À Luziane Franciscon (Embrapa Florestas) pela execução de parte das análises estatísticas. E ao Rubson Sibaldelli (Embrapa Soja) do Laboratório de Agrometeorologia pela coleta, consistência e disponibilização dos dados meteorológicos.

À Fundação Meridional de Apoio à Pesquisa Agropecuária pela disponibilização de trabalhadores rurais durante a instalação, manutenção e colheita dos experimentos de campo.

Ao professor da Universidade Federal de Alfenas, Dr. Eric Batista Ferreira, pela disponibilidade e agilidade no esclarecimento de dúvidas sobre as análises estatísticas.

Ao Dr. Cleiton Henrique de Sequeira (Koch Agronomic Services, LLC) por ter providenciado o inibidor de urease NBPT e informações relacionadas a este produto.

Aos professores e funcionários da Universidade Estadual do Norte do Paraná, em especial à Sônia, pela dedicação ao Programa de Mestrado.

Aos meus pais, José e Iraci, e à minha família, Claudinei, Denise, Maria Beatriz, Silene, Leandro e Luísa, por todo amor, carinho e incentivo.

Ao Luiz Rodrigo, pelo amor, pelo apoio e compreensão nas decisões profissionais.

EPÍGRAFE

*“Porque a vida é fugaz, tão
veloz, tão passageira. A gente sofre demais
por bobagens, por besteira. Importa é viver
em paz, pois quando olhamos pra trás, lá se
foi a vida inteira”.*

Jenário de Fátima.

FERREIRA, L. A. R. **Manejo da fertilização nitrogenada e do inibidor de urease NBPT na cultura do trigo**. Dissertação de Mestrado em Agronomia – Universidade Estadual do Norte do Paraná, *Campus Luiz Meneghel*, Bandeirantes, 2021.

RESUMO

A escolha certa da fonte, dose e época de aplicação do fertilizante nitrogenado contribui para minimizar as perdas de nitrogênio (N). Além disso, há aditivos químicos capazes de reduzir a volatilização de amônia, como o inibidor de urease N-(n-butil) tiofosfórico triamida (NBPT). O objetivo deste trabalho foi avaliar diferentes técnicas de manejo agrônomo dos fertilizantes ureia e nitrato de amônio, assim como o uso de NBPT para aumentar a eficiência da ureia, visando melhorar a nutrição nitrogenada e a produtividade do trigo, considerando três condições ambientais. Dois distintos experimentos foram realizados em situação de campo em duas localidades no estado Paraná (Londrina e Ponta Grossa). Em Londrina foram utilizadas condições de sequeiro (L_{seq}) e de irrigação (L_{irrig}), enquanto em Ponta Grossa o trigo foi cultivado apenas em sequeiro (PG_{seq}). O primeiro experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizados em arranjo fatorial $(2 \times 2 \times 2) + 1$, sendo duas doses de N (40 e 80 kg ha⁻¹), duas fontes de N (nitrato de amônio e ureia), duas épocas para realização da adubação nitrogenada (durante a semeadura da lavoura ou no início do perfilhamento das plantas), e um tratamento adicional com ausência de adubação nitrogenada (testemunha). Características agrônomicas avaliadas: rendimento de grãos, peso hectolítrico, peso de mil grãos, altura e acamamento de plantas, índice de colheita aparente, densidade de plantas férteis, matéria seca da parte aérea (MSPA), teor e conteúdo de N na MSPA, e eficiências de utilização de N para rendimento de grãos (EUN_{RG}) e para produção de MSPA (EUN_{MSPA}). A adubação nitrogenada reduziu o índice de colheita em L_{seq} e a EUN_{RG} em ambas condições hídricas de Londrina; no entanto, ela aumentou a EUN_{MSPA} em todas condições ambientais. Ureia e nitrato de amônio apresentaram eficiência equivalente quanto ao rendimento de grãos de trigo, independente da dose ou época de adubação. Em L_{irrig} e L_{seq} a dose e a época de aplicação de N não influenciaram o rendimento de grãos. Porém, em condição de clima mais frio (PG_{seq}), a utilização de maior dose de N na semeadura proporcionou maior rendimento de grãos, peso de mil grãos e densidade de plantas férteis. Portanto, a dose de N pode ser reduzida em condições ambientais que favorecem a mineralização da matéria orgânica do solo e a decomposição da palhada de soja. A opção por ureia ou nitrato de amônio pode ser baseada em critérios econômicos em

ambientes com baixo déficit hídrico e baixo potencial de volatilização de NH_3 . A fertilização com N realizada exclusivamente na semeadura pode ser adequada para suprir as necessidades de N da cultura. O segundo experimento foi desenvolvido em delineamento em blocos casualizados em arranjo fatorial $(2 \times 4 \times 2) + 1$, composto por duas doses de N (40 e 80 kg ha⁻¹), ureia tratada com quatro doses de NBPT (0, 250, 500 e 2000 mg kg⁻¹), duas épocas para realização da adubação nitrogenada (durante a semeadura da lavoura ou no início do perfilhamento das plantas), e um tratamento adicional com ausência de adubação nitrogenada (testemunha). Foram avaliadas as mesmas características agronômicas do primeiro experimento. As condições ambientais determinaram a eficácia da fertilização nitrogenada e do NBPT, influenciando a EUN e o rendimento de grãos. O NBPT não influenciou o rendimento de grãos em ambientes com solos ácidos e maior disponibilidade hídrica. A fertilização nitrogenada realizada exclusivamente na semeadura foi suficiente para suprir a necessidade de N do trigo. Concluimos que a fertilização com N e o manejo do NBPT devem considerar as características ambientais (como pH, temperatura e umidade do solo) durante a estação de crescimento do trigo.

Palavras-chave: *Triticum aestivum*; Volatilização de amônia; N-(n-butil) tiofosfórico triamida; Nutrição mineral de plantas; Ureia; Nitrato de amônio.

FERREIRA, L. A. R. **Management of nitrogen fertilization and NBPT urease inhibitor in wheat crop**. Master Dissertation in Agronomy – Universidade Estadual do Norte do Paraná, *Campus Luiz Meneghel*, Bandeirantes, 2021.

ABSTRACT

The suitable choice of the source, rate and timing of application of nitrogen (N) fertilizer helps to minimize N losses. In addition, there are chemical additives capable of reducing ammonia volatilization, such as the urease inhibitor N-(n-butyl) triamide thiophosphate (NBPT). The objective of this work was to evaluate different agronomic management techniques for urea and ammonium nitrate fertilizers, as well as the use of NBPT to increase urea efficiency, aiming to improve wheat N nutrition and grain yield, considering three environmental conditions. Two different experiments were carried out in field situation in two locations in Paraná State (Londrina and Ponta Grossa). In Londrina, rainfed ($L_{rainfed}$) and irrigation (L_{irrig}) conditions were used, while in Ponta Grossa wheat was grown only in rainfed ($PG_{rainfed}$). The first experiment was carried out in a randomized block design in a factorial arrangement $(2 \times 2 \times 2) + 1$, with two rates of N (40 and 80 kg ha⁻¹), two sources of N (ammonium nitrate and urea), two timings for N fertilization (during crop sowing or at the beginning of plant tillering), and an additional treatment with no N fertilization (control). Agronomic characteristics evaluated: grain yield, hectolitic weight, thousand grain weight, plant height and lodging, apparent harvest index, density of fertile plants, shoot dry matter (SDM), N concentration and accumulation in the SDM, and N utilization efficiency for grain yield (NUE_{GY}) and for SDM production (NUE_{SDM}). Nitrogen fertilization reduced harvest index in $L_{rainfed}$ and NUE_{GY} in both water conditions in Londrina; however, it increased NUE_{SDM} in all environmental conditions. Urea and ammonium nitrate showed equivalent efficiency in terms of wheat grain yield, regardless of rate or timing of fertilization. In L_{irrig} and $L_{rainfed}$ the rate and the timing of N application did not influence grain yield. However, in a colder climate (PG_{seq}), the use of a higher N rate at sowing provided greater grain yield, thousand grain weight, and density of fertile plants. Therefore, the N rate can be reduced in environmental conditions that favor the mineralization of soil organic matter and the decomposition of soybean straw. The option for urea or ammonium nitrate can be based on economic criteria in environments with low water deficit and low potential for NH₃ volatilization. Nitrogen fertilization carried out exclusively at sowing may be suitable to supply N crop requirements. The second experiment was carried out in a randomized block

design in a factorial arrangement $(2 \times 4 \times 2) + 1$, consisting of two rates of N (40 and 80 kg ha⁻¹), urea treated with four rates of NBPT (0, 250, 500, and 2000 mg kg⁻¹), two timings for N fertilization (during crop sowing or at the beginning of plant tillering), and an additional treatment with no N fertilization (control). The same agronomic characteristics of the first experiment were evaluated. Environmental conditions set the effectiveness of N fertilization and NBPT, influencing NUE and grain yield. NBPT did not influence grain yield in environments with acidic soils and high water availability. Nitrogen fertilization carried out exclusively at sowing was enough to supply wheat N requirement. We conclude that N fertilization and NBPT management should consider environmental features (such as soil pH, temperature and humidity) during the wheat-growing season.

Keywords: *Triticum aestivum*; Ammonia volatilization; N-(n-butyl) triamide thiophosphate; Mineral plant nutrition; Urea; Ammonium nitrate.

LISTA DE FIGURAS

REVISÃO DE LITERATURA

Figura 1 – Produção média de trigo nos estados do Brasil	05
Figura 2 – Representação esquemática da volatilização da amônia (NH_3) a partir da adubação com ureia [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$]	17

CAPÍTULO A

Figura 1 – Balanço hídrico decenal na estação de crescimento do trigo na safra de 2016 em Londrina e Ponta Grossa	39
--	----

CAPÍTULO B

Figura 1 – Irrigação e precipitação, umidade relativa do ar e temperatura média na estação de crescimento do trigo em 2016 em Londrina e Ponta Grossa	77
Figura 2 – Desdobramento da análise de variância para densidade de plantas férteis da cultivar de trigo BRS Galha-Azul, cultivada em três ambientes (Londrina/irrigado, Londrina/sequeiro e Ponta Grossa/sequeiro), com duas doses de N (40 e 80 kg ha ⁻¹), na forma de ureia tratada com quatro doses de NBPT (0, 250, 500 e 2000 mg kg ⁻¹), considerando duas épocas de adubação (na semeadura e no início do perfilhamento)	80
Figura 3 – Rendimento de grãos da cultivar de trigo BRS Galha-Azul, cultivada em Londrina em condição de sequeiro, adubada com ureia tratada com quatro doses de NBPT (0, 250, 500 e 2000 mg kg ⁻¹)	82
Figura 4 – Desdobramento da análise de variância para altura de planta da cultivar de trigo BRS Galha-Azul, cultivada em Londrina em condição de sequeiro, com ureia tratada com quatro doses de NBPT (0, 250, 500 e 2000 mg kg ⁻¹), considerando duas épocas de adubação (na semeadura e no início do perfilhamento)	84
Figura 5 – Desdobramento da análise de variância para matéria seca da parte aérea e índice de colheita aparente da cultivar de trigo BRS Galha-Azul, cultivada em dois ambientes (Londrina/irrigado e Ponta Grossa/sequeiro), com duas doses de N (40 e 80 kg ha ⁻¹), na forma de ureia tratada com quatro doses de NBPT (0, 250, 500 e 2000 mg kg ⁻¹), considerando duas épocas de adubação (na semeadura e no início do perfilhamento)	86
Figura 6 – Desdobramento da análise de variância para teor e conteúdo de nitrogênio (N) na matéria seca da parte aérea (MSPA), eficiências de utilização de N para produção de MSPA no estágio de florescimento e para rendimento de grãos, da cultivar de trigo BRS Galha-	

Azul, cultivada em três ambientes (Londrina/irrigado, Londrina/sequeiro e Ponta Grossa/sequeiro), com duas doses de N (40 e 80 kg ha⁻¹), na forma de ureia tratada com quatro doses de NBPT (0, 250, 500 e 2000 mg kg⁻¹), considerando duas épocas de adubação (na semeadura e no início do perfilhamento) 89

LISTA DE TABELAS

REVISÃO DE LITERATURA

Tabela 1 – Composição química, teores de nutrientes e preço médio de fertilizantes nitrogenados na safra 2019 no Paraná 16

CAPÍTULO A

Tabela 1 – Significância da análise de variância dos efeitos principais (dose de N, fonte de N e época de adubação) e de suas interações; e médias de densidade de plantas férteis, rendimento de grãos, peso hectolítrico e peso de mil grãos da cultivar de trigo BRS Gralha-Azul, cultivada em três ambientes (Londrina-sequeiro, Londrina-irrigado e Ponta Grossa-sequeiro), com duas doses e duas fontes de N, considerando duas épocas de adubação 41

Tabela 2 – Desdobramento da análise de variância para a interação dose de N *versus* época de adubação, para rendimento de grãos da cultivar de trigo BRS Gralha-Azul, cultivada em Ponta Grossa em condições de sequeiro com duas doses de N e duas épocas de adubação 42

Tabela 3 – Desdobramento da análise de variância para as interações fonte de N *versus* dose de N e fonte de N *versus* época de adubação para peso de mil grãos da cultivar de trigo BRS Gralha-Azul cultivada em Londrina em condições de sequeiro e irrigação..... 43

Tabela 4 – Significância da análise de variância dos efeitos principais (dose de N, fonte de N e época de adubação) e de suas interações; e médias de altura, acamamento de plantas, matéria seca da parte aérea e índice de colheita aparente da cultivar de trigo BRS Gralha-Azul, cultivada em três ambientes (Londrina-sequeiro, Londrina-irrigado e Ponta Grossa-sequeiro), com duas doses e duas fontes de N, considerando duas épocas de adubação 44

Tabela 5 – Desdobramento da análise de variância para a interação fonte de N *versus* época de adubação, para matéria seca da parte aérea no estágio de florescimento da cultivar de trigo BRS Gralha-Azul, cultivada em Londrina em condição de sequeiro, com duas fontes de N

(nitrato de amônio e ureia) em duas épocas de adubação (semeadura e início do perfilhamento) 45

Tabela 6 – Desdobramento da análise de variância para a interação tripla dose de N *versus* fonte de N *versus* época de adubação, para matéria seca da parte aérea no estágio de florescimento e índice de colheita aparente da cultivar de trigo BRS Gralha-Azul, cultivada em Ponta Grossa em condições de sequeiro com duas doses e duas fontes de N, considerando duas épocas de adubação 46

Tabela 7 – Significância da análise de variância dos efeitos principais (dose de N, fonte de N e época de adubação) e de suas interações; e médias de teor e conteúdo de nitrogênio (N) na matéria seca da parte aérea (MSPA), e eficiências de utilização de N para rendimento de grãos e para produção de MSPA no estágio de florescimento da cultivar de trigo BRS Gralha-Azul, cultivada em três ambientes (Londrina–sequeiro, Londrina–irrigado e Ponta Grossa–sequeiro), com duas doses e duas fontes de N, considerando duas épocas de adubação 48

Tabela 8 – Desdobramento da análise de variância para a interação fonte de N *versus* época de adubação, para teor e conteúdo de N na MSPA, e eficiências de utilização de N para RG e para produção de MSPA no estágio de florescimento da cultivar de trigo BRS Gralha-Azul, cultivada em dois ambientes (Londrina–sequeiro e Londrina–irrigado), com duas fontes de N (nitrato de amônio e ureia) em duas épocas de adubação (semeadura e início do perfilhamento) 49

Tabela 9 – Desdobramento da análise de variância para a interação tripla dose de N *versus* fonte de N *versus* época de adubação, para eficiência de utilização de N para produção de MSPA no estágio de florescimento da cultivar de trigo BRS Gralha-Azul, cultivada em Ponta Grossa em condições de sequeiro com duas doses e duas fontes de N, considerando duas épocas de adubação 51

CAPÍTULO B

Tabela 1 – Significância da análise de variância dos efeitos principais (dose de nitrogênio, dose de inibidor de urease NBPT, e época de adubação) e de suas interações; e médias de densidade de plantas férteis, rendimento de grãos, peso hectolítrico e peso de mil grãos da cultivar de trigo BRS Gralha-Azul, cultivada em três ambientes (Londrina–irrigado, Londrina–sequeiro e Ponta Grossa–sequeiro), com duas doses de N, na forma de ureia tratada com quatro doses de NBPT, considerando duas épocas de adubação 79

Tabela 2 – Desdobramento da análise de variância para a interação dose de nitrogênio (N) <i>versus</i> época de adubação, para rendimento de grãos e peso hectolétrico da cultivar de trigo BRS Gralha-Azul, cultivada em dois ambientes (Ponta Grossa–sequeiro e Londrina–irrigado), com duas doses de N (40 e 80 kg ha ⁻¹) aplicadas em duas épocas de adubação (semeadura e no início do perfilhamento)	81
Tabela 3 – Significância da análise de variância dos efeitos principais (dose de nitrogênio, dose de inibidor de urease NBPT, e época de adubação) e de suas interações; e médias de altura, acamamento de plantas, matéria seca da parte aérea e índice de colheita aparente da cultivar de trigo BRS Gralha-Azul, cultivada em três ambientes (Londrina–irrigado, Londrina–sequeiro e Ponta Grossa–sequeiro), com duas doses de N, na forma de ureia tratada com quatro doses NBPT, considerando duas épocas de adubação	83
Tabela 4 – Desdobramento da análise de variância para a interação dose de nitrogênio (N) <i>versus</i> época de adubação, para acamamento de plantas e índice de colheita aparente da cultivar de trigo BRS Gralha-Azul, cultivada em dois ambientes (Londrina–sequeiro e Ponta Grossa–sequeiro), com duas doses de N (40 e 80 kg ha ⁻¹) aplicadas em duas épocas de adubação (semeadura e no início do perfilhamento)	85
Tabela 5 – Significância da análise de variância dos efeitos principais (dose de nitrogênio, dose de inibidor de urease NBPT, e época de adubação) e de suas interações; e médias de teor e conteúdo de N na matéria seca da parte aérea (MSPA) no estágio de florescimento, e eficiências de utilização de N para produção de MSPA e para rendimento de grãos da cultivar de trigo BRS Gralha-Azul, cultivada em três ambientes (Londrina–irrigado, Londrina–sequeiro e Ponta Grossa–sequeiro), com duas doses de N, na forma de ureia tratada com quatro doses NBPT, considerando duas épocas de adubação	88

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1. CULTURA DO TRIGO NO BRASIL	4
2.2. NUTRIÇÃO, METABOLISMO MINERAL E EFICIÊNCIA DE UTILIZAÇÃO DE NITROGÊNIO NA PLANTA	7
2.3. DINÂMICA DO NITROGÊNIO NO SOLO.....	9
2.4. FERTILIZAÇÃO NITROGENADA DO TRIGO	14
2.5. FERTILIZANTES NITROGENADOS	15
2.6. INIBIDORES DE UREASE	18
REFERÊNCIAS	21
3. CAPÍTULO A – EFICIÊNCIA DE UTILIZAÇÃO DE NITROGÊNIO E RENDIMENTO DE GRÃOS DE TRIGO AFETADOS PELO MANEJO DA ADUBAÇÃO E PELAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS ...	30
3.1. INTRODUÇÃO	32
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	34
3.3. RESULTADOS	38
3.4. DISCUSSÃO	51
3.5. CONCLUSÕES	60
3.6. REFERÊNCIAS	60
4. CAPÍTULO B – EFICIÊNCIA DE UTILIZAÇÃO DE NITROGÊNIO E RENDIMENTO DE GRÃOS DE TRIGO AFETADOS PELA UREIA TRATADA COM NBPT E PELAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS	67
4.1. INTRODUÇÃO	69
4.2. MATERIAL E MÉTODOS	72
4.3. RESULTADOS	77
4.4. DISCUSSÃO	90
4.5. CONCLUSÕES	99
4.6. REFERÊNCIAS	99
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	107

1. INTRODUÇÃO GERAL

O trigo é um cereal amplamente utilizado na alimentação humana e animal, principalmente nas formas de farinha e farelo, respectivamente (OLIVEIRA NETO e SANTOS, 2017). Sendo assim, a cultura do trigo apresenta impacto significativo na economia brasileira, com 2,34 milhões de hectares destinados à sua produção (CONAB, 2020a).

O nitrogênio (N) é o nutriente que exerce maior influência no crescimento vegetal (BREDEMEIER e MUNDSTOK, 2000). Entretanto, a utilização do N como fertilizante requer cuidados especiais quanto à época de aplicação, fontes e doses utilizadas (TEIXEIRA FILHO et al., 2010a). De todos os nutrientes que se encontram no sistema solo-planta-atmosfera, o N é o que apresenta maior número de transformações bioquímicas, especialmente no solo (MOREIRA e SIQUEIRA, 2006). Em decorrência das grandes perdas de N para o ambiente, especialmente em formas gasosas, a eficiência de utilização de N–fertilizante (principalmente na forma de ureia) pelas culturas agrícolas é baixa, o que justifica a grande preocupação com perdas de N pela volatilização de amônia (NH_3) (VIEIRA, 2017). Portanto, otimizar os efeitos da adubação nitrogenada é um grande desafio, pois não basta simplesmente fornecer N às plantas, é preciso também considerar todos os efeitos ambientais e os sistemas agronômicos de produção (FOLONI et al., 2014).

As variações de eficiência agronômica das fontes de fertilizantes nitrogenados estão relacionadas à precipitação, temperatura e potencial de volatilização de NH_3 (WIETHÖLTER, 2011). As principais fontes de N atualmente utilizadas na agricultura são nitrato de amônio, ureia e sulfato de amônio.

O nitrato de amônio (NH_4NO_3) contém 33% de N, sendo metade na forma amoniacal e a outra metade na forma nítrica, ambas prontamente disponíveis às plantas. Ele é produzido a partir da reação do gás NH_3 com ácido cítrico e posteriormente solidificado em forma de grânulos. O nitrato de amônio é adequado para fertirrigação e aplicação foliar, devido à sua elevada solubilidade (REETZ, 2017), sendo uma fonte segura para ser utilizada no momento da semeadura, pois não prejudica a germinação das sementes (FOLONI et al., 2014). Entretanto, ele apresenta custo unitário (por unidade de N) cerca de 42% superior à ureia.

A ureia [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$] se destaca devido à sua produção a partir de compostos simples como a NH_3 e o CO_2 , que a torna menos onerosa do que os demais fertilizantes nitrogenados, além de apresentar alta concentração de N (45%), reduzindo o custo com transporte e armazenamento (FRANCO e SARAIVA NETTO, 2007; FRAZÃO et al., 2014). No entanto, a adubação nitrogenada na forma de ureia pode resultar em maiores perdas de N por

volatilização, devido à reação deste fertilizante com enzimas do solo (DIAS et al., 1992). A enzima urease (ureia amido-hidrolase, EC 3.5.1.5), presente naturalmente no solo, catalisa a hidrólise da ureia (KANDELER e GERBER, 1988), sendo que o amônio (NH_4^+) formado é passível de ser convertido em NH_3 , que é perdido por volatilização (TASCA et al., 2011). Além disso, a ureia apresenta restrições quanto à sua utilização simultânea com a semeadura dos grãos, uma vez que o acúmulo de gás amônia (produzido durante o processo de transformação do N-amídico em N-amoniaco) e o excesso de absorção de NH_4^+ e NO_3^- são prejudiciais às sementes e plântulas, podendo causar falhas no estande de plantas da lavoura (FOLONI et al., 2014).

A substância química N-(n-butil) tiofosfórico triamida (NBPT) tem sido utilizada como inibidor de urease, com relevante importância prática na agricultura. A dose comercial do NBPT normalmente utilizada como aditivo à ureia varia entre 500 e 1200 mg kg^{-1} (CANTARELLA et al., 2018). Considerando que a ureia provavelmente permanecerá como uma das principais fontes de N para as culturas agrícolas, o uso de NBPT tem sido uma alternativa para minimizar as perdas de N por volatilização, principalmente quando a incorporação da ureia no solo não for viável (CANTARELLA e MARCELINO, 2008).

Embora tenham sido conduzidos diversos estudos com o uso de NBPT, há questionamentos quanto à sua eficiência frente às diferentes condições meteorológicas e variações de pH e textura do solo, gerando dúvidas quanto à viabilidade de sua utilização em determinadas situações nas quais a degradação dessa substância pode ser maior (SILVA et al., 2017).

O uso de NBPT tem apresentado resultados positivos na inibição da urease, sendo que o custo da ureia tratada com NBPT é cerca de 10 a 30% maior do que o custo da ureia pura (GUELFI, 2017). Além disso, há dúvidas a respeito da dose de NBPT que deve ser adicionada à ureia, considerando as doses de N a serem aplicadas na lavoura e as propriedades do solo que receberá a fertilização nitrogenada (SILVA et al., 2017). Portanto, novos estudos devem ser realizados a fim de otimizar a relação custo/benefício da utilização deste inibidor de urease na agricultura, para diferentes culturas agrícolas.

Considerando que a eficiência da fertilização nitrogenada está fortemente relacionada às condições edafoclimáticas, e que a volatilização é o principal processo de perda de N para o ambiente, podemos inferir que, em condições favoráveis à volatilização, o uso do nitrato de amônio ou a adição de NBPT à ureia podem proporcionar melhor aproveitamento do N e, consequentemente, maior produtividade da lavoura de trigo, quando comparados ao uso de ureia pura.

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar diferentes técnicas de manejo agronômico dos fertilizantes ureia e nitrato de amônio, assim como o uso de NBPT para aumentar a eficiência da ureia, visando melhorar a nutrição nitrogenada e a produtividade do trigo, considerando três condições ambientais.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Cultura do trigo no Brasil

O trigo (*Triticum aestivum* L.) é uma das principais plantas cultivadas para alimentação humana e animal, utilizada em ampla escala geográfica. Originado de gramíneas silvestres existentes no continente Asiático, às margens dos rios Tigre e Eufrates, nos anos 15.000 a.C., existem evidências que comprovam que as características do trigo são conhecidas há mais de 2.500 anos, como relatos estimados de 550 a.C. (SCHEEREN et al., 2015).

Pertencente à família *Poaceae* (previamente chamada de *Gramineae*), o trigo é uma monocotiledônea cuja altura varia de acordo com o genótipo e com o ambiente (SCHEEREN et al., 2015). O sistema radicular fasciculado é composto por raízes seminais, permanentes e adventícias. O colmo é geralmente oco e cilíndrico e pode apresentar de três a oito folhas. Cerca de 15 dias após a germinação ocorre o início da formação de novos colmos, fase denominada perfilhamento. A inflorescência do trigo é uma espiga formada por espiguetas que, por sua vez, são constituídas de flores. Cada flor origina um único fruto do tipo cariopse, seco e pequeno, denominado grão.

O trigo é uma planta com metabolismo fotossintético do tipo C3, sendo que temperaturas altas exercem efeitos deletérios, especialmente na fase de enchimento de grãos (TAIZ et al., 2017). O aumento da fotorespiração e a diminuição da fotossíntese líquida aceleram a senescência das folhas em condições de temperaturas elevadas. De fato, a temperatura é um fator limitante quando se trata da cultura do trigo, uma vez que grande parte dos materiais genéticos passam pela vernalização (necessidade de acúmulo de períodos de baixas temperaturas durante os estádios de germinação–formação do colmo), que é um processo importante para que a planta passe para as fases seguintes em boas condições de atingir maior produtividade (MANFRON et al., 1993). Geadas também podem alterar significativamente a produção, principalmente quando o trigo se encontra no estágio inicial de desenvolvimento ou durante o florescimento (MANOSSO, 2005). A temperatura ideal para o trigo é de aproximadamente 20 °C (SCHEEREN et al., 2015).

Ainda que a água seja de extrema importância para a cultura, o trigo pode ser cultivado num período menos chuvoso, uma vez que apresenta menor demanda hídrica, quando comparado a outras culturas, como soja e milho (MANOSSO, 2005). Ensaios realizados pelo Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR, 2000) demonstraram maior demanda de água pelo trigo até os 47 dias após a emergência (DAE), período que

compreendeu o início do perfilhamento até a elongação final do colmo. Libardi e Costa (1997) observaram que a cultura consome aproximadamente $3,02 \text{ mm dia}^{-1}$ de água, quantidade variável de acordo com as particularidades climáticas de cada região.

O Brasil apresentou mais de dois milhões de hectares semeados com trigo na safra de 2020, cuja produtividade média estimada foi de 2.526 kg ha^{-1} (CONAB, 2020a). A maior produção brasileira de trigo está concentrada no Paraná e Rio Grande do Sul. Juntos, esses dois estados são responsáveis por cerca de 85% da produção nacional (Figura 1) (CONAB, 2020a). Entretanto, através do uso de tecnologias fornecidas pela pesquisa, principalmente aquelas relacionadas ao desenvolvimento de cultivares mais adaptadas a diversas regiões edafoclimáticas, é possível o cultivo do trigo na região central do Brasil, com boa produtividade (principalmente em sistema irrigado) e significativa contribuição estratégica para o abastecimento do cereal no país (OLIVEIRA NETO e SANTOS, 2017).



Figura 1. Produção média de trigo nos estados do Brasil. Fonte: CONAB (2020a).

O estado do Paraná apresenta posição geográfica que possibilita grande diversidade de ambientes aptos à produção agrícola. Entretanto, a faixa de transição entre as zonas tropical e temperada contempla elevada variabilidade dos elementos climáticos, como geada, chuva, fotoperíodo, etc. (FOLONI et al., 2016). Deste modo, a adaptação de cultivares de trigo às diferentes condições edafoclimáticas do Paraná deve ser avaliada por meio de experimentação a nível microrregional.

Para suprir a demanda interna por trigo no Brasil, em março de 2020 foram importadas 659,8 mil toneladas de trigo, sendo 91,8% deste valor oriundo da Argentina, e o restante do Uruguai, Paraguai e Estados Unidos (CONAB, 2020a). A dependência de importação para o abastecimento interno de trigo está relacionada a fatores como custo de produção e qualidade do produto nacional, uma vez que o trigo produzido no Brasil possui frequentemente menor concentração de proteínas formadoras de glúten. Outro fator que impacta a competitividade do trigo está relacionado à logística, uma vez que o sistema rodoviário apresenta maior custo e menor capacidade de transporte do que os sistemas aquaviários e ferroviários, os quais são deficientes em infraestrutura no Brasil. Desta forma, torna-se necessária a adoção de medidas que reduzam o custo de transporte de trigo desde as áreas produtoras até as demais localidades consumidoras do produto, principalmente nas regiões nordeste e norte do país (OLIVEIRA NETO e SANTOS, 2017).

Existem vários desafios fitossanitários na triticultura, como a ocorrência de doenças extremamente agressivas ao trigo e que apresentam controle químico insatisfatório. No caso do brusone (*Pyricularia grisea*), a baixa eficácia do controle químico é decorrente da diversidade de isolados existentes, de favoráveis condições ambientais (temperatura e umidade relativa do ar) para o desenvolvimento do fungo, e do alto grau de suscetibilidade das cultivares disponíveis no mercado brasileiro (ROCHA et al., 2014). Quanto à giberela, causada pelo fungo *Giberella zeae*, destaca-se a dificuldade dos fungicidas em atingir os sítios de infecção (PANISSON et al., 2002) e também a produção de micotoxinas que contaminam os grãos (BUTRINOWSKI, 2015). Doenças foliares também são limitantes da produtividade das lavouras, destacando-se a mancha amarela/bronzeada (*Drechslera tritici-repentis*), a mancha marrom (*Bipolaris sorokiniana*), a mancha da gluma (*Stagonospora nodorum*), a ferrugem da folha (*Puccinia recondita* f.sp. *tritici*) e o oídio (*Blumeria graminis* f.sp. *tritici*) (BACALTCHUK et al., 2006). Deste modo, o melhoramento genético do trigo deve considerar também o desenvolvimento de novas cultivares geneticamente resistentes a essas doenças. Ressalta-se que o melhoramento genético também é primordial para obtenção de

cultivares resistentes à germinação de grãos na espiga, a qual é ocasionada por alta precipitação pluviométrica após a maturação fisiológica dos grãos (FRANCO et al., 2009).

2.2. Nutrição, metabolismo mineral e eficiência de utilização de nitrogênio na planta

A disponibilidade de N no solo é um fator importante para a produção do trigo, uma vez que sua influência no crescimento das plantas é maior do que de outros nutrientes (BREDEMEIER e MUNDSTOK, 2000).

O N exerce papel fundamental na fisiologia dos vegetais. Atua como constituinte das paredes celulares, proteínas e ácidos nucleicos (RNA e DNA), apresentando função na expansão da área foliar e formação dos botões florais. O N faz parte de enzimas, coenzimas, fitocromos e da molécula de clorofila, que se localiza principalmente nos cloroplastos da folha e exerce papel fundamental na atividade fotossintética (TAIZ et al., 2017).

O sintoma característico de deficiência de N nas plantas é a clorose (amarelecimento) foliar, em função do colapso dos cloroplastos e decréscimo do conteúdo da clorofila (TAIZ et al., 2017). Como o N é altamente móvel no interior da planta, os sintomas de sua deficiência tendem a aparecer primeiro nas folhas mais velhas, enquanto que as folhas mais jovens permanecem inicialmente saudáveis em função da remobilização de N em direção aos órgãos e tecido 'drenos'. Além disso, a falta de N resulta em folhas menores, redução da taxa fotossintética, baixo perfilhamento, menor teor de proteínas nos grãos e decréscimo da produtividade da lavoura.

O gás dinitrogênio (N_2) compõe aproximadamente 79% da atmosfera terrestre, porém essa forma química não é diretamente absorvida pelas plantas, sendo necessária sua transformação prévia para as formas de amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-) através das fixações industrial, biológica e atmosférica (FAQUIN, 2005). A fixação industrial refere-se à produção de adubos nitrogenados a partir da quebra da molécula de N_2 e produção de amônia (NH_3), produto chave para obtenção dos demais fertilizantes nitrogenados. A fixação biológica de N (FBN) trata da conversão de N_2 atmosférico para outras formas combinadas por meio da ação de microrganismos, sendo o principal processo de adição de N mineral ao solo. A FBN é mediada por um complexo enzimático denominado nitrogenase, com participação direta de nutrientes minerais como Fe, Mo, Mg, Co e P (REIS e TEIXEIRA, 2005). Para a cultura do trigo, estudos que relacionam o uso de bactérias diazotróficas endofíticas (como por exemplo aquelas do gênero *Azospirillum* e *Herbaspirillum*) à fixação biológica e/ou ao melhor aproveitamento da adubação nitrogenada, tem apresentado resultados positivos quanto ao

suprimento de N nos primeiros dias do desenvolvimento da cultura (ROESCH et al., 2005), melhorando o acúmulo de N nas plantas (SALA et al., 2005) e a produtividade da lavoura (SALA et al., 2007; 2008). Entretanto, efeitos não significativos na produtividade de plantas de trigo tratadas com essas bactérias foram observados por Rodrigues et al. (2000), Rodrigues et al. (2014) e Silva e Pires (2017). As inconsistências referentes ao ganho produtivo podem estar relacionadas à especificidade entre bactéria e hospedeiro (CANTARELLA, 2007) e indicam a necessidade de estudos adicionais no que diz respeito à FBN para o melhor aproveitamento de N pelo trigo.

As plantas são capazes de absorver o N de diversas formas: N_2 , no caso de leguminosas, por meio da FBN; e como íons NH_4^+ e NO_3^- , que são rapidamente absorvidos pelas raízes (MARSCHNER, 2012). A maior absorção de NH_4^+ ou NO_3^- está relacionada às variações de pH, sendo que em meio ácido há predomínio da absorção de NO_3^- enquanto que os meios neutro e alcalino favorecem a absorção de NH_4^+ .

As raízes das plantas absorvem a maior quantidade de N na forma de NO_3^- . Porém, a nível celular, a planta não é capaz de empregar diretamente esta forma de N, reduzindo-a a NH_4^+ para ser incorporado nos constituintes celulares, formando compostos nitrogenados (LAM et al., 1996). O processo de redução de NO_3^- a NH_4^+ ocorre nos cloroplastos com auxílio da enzima nitrato redutase. O NH_4^+ que é absorvido do solo, ou produzido pelo processo de redução, não se acumula na planta, pois é tóxico e inibe a produção de ATP nos cloroplastos e nas mitocôndrias, agindo como desacoplador da fosforilação. As enzimas glutamina sintetase, glutamato sintase, glutamato desidrogenase, aspartato aminotransferase e asparagina sintetase são responsáveis pela biossíntese dos aminoácidos portadores de N (glutamina, glutamato, asparagina e aspartato). Estudos bioquímicos revelaram a existência de múltiplas isoenzimas para cada uma dessas enzimas (LAM et al., 1996).

O N absorvido pelas raízes é transportado através do xilema, via corrente respiratória, principalmente nas formas de NO_3^- , NH_4^+ e aminoácidos (Malavolta e Moraes, 2007). O N é translocado via floema das folhas para outras partes da planta, inclusive raízes, nas formas de NO_3^- , NH_4^+ , aminoácidos ou produtos da sua assimilação. Durante a senescência da folha, elevam-se os níveis de compostos nitrogenados no floema, sendo que esta translocação de N se destina principalmente às sementes, como ocorre nas plantas de trigo (HOPKINS, 2000).

A eficiência de utilização (EU) de um nutriente pelas plantas tem sido calculada como o quociente da massa seca (MS; g planta⁻¹) produzida pela planta pelo conteúdo do nutriente (CONT; mg planta⁻¹) acumulado na biomassa vegetal (SWIADER et al., 1994). Siddiqi e Glass (1981) propuseram um cálculo específico de índice de EU ($EU_{S\&G}$; g² mg⁻¹) em função

da concentração do nutriente na massa seca ($CONC = CONT/MS$; $mg\ g^{-1}$), isto é, $EU_{S\&G} = MS/CONC$, ou seja, $EU_{S\&G} = (MS)^2/CONT$.

De acordo com Siddiqi e Glass (1981), o conceito de EU, anteriormente amplamente disseminado, correspondente à razão da quantidade de massa seca pelo conteúdo de nutriente presente nesta biomassa, representaria um 'quociente' cuja aplicação seria limitada por não levar em conta a taxa de crescimento da planta e a dinâmica do nutriente no sistema solo-planta. Eles relatam que o crescimento da planta está também relacionado à concentração do nutriente nos tecidos e não somente à quantidade absoluta acumulada, pois o crescimento só ocorre a partir de uma concentração mínima do nutriente no tecido vegetal, que é diferente entre espécies ou variedades. Portanto, a concentração do nutriente no tecido tem maior importância do que o conteúdo total. Este foi o argumento básico desses autores para redefinirem a EU como um novo índice ($EU_{S\&G}$) obtido pela razão entre a quantidade de massa seca e a concentração do nutriente no tecido. Segundo Baligar et al. (2001), como este índice leva em conta tanto parâmetros biométricos como fisiológicos, ele é uma ferramenta eficaz para a avaliação do estado nutricional das plantas.

Para aumentar a EU dos nutrientes pelas plantas é necessário selecionar materiais genéticos com facilidade de absorver e transformar esses nutrientes em biomassa e produção de alimentos. A aquisição de nutrientes depende da eficiência dos mecanismos de absorção e também do volume de solo explorado pelas raízes. Por sua vez, a EU depende do transporte dos nutrientes para a parte aérea da planta e de sua exigência metabólica (MARTINEZ et al., 1993). Desta forma, o uso do índice $EU_{S\&G}$ para classificação de genótipos evita que plantas eficientes na absorção de nutrientes, mas de baixa produção de biomassa, sejam selecionadas em programas de melhoramento genético.

2.3. Dinâmica do nitrogênio no solo

Incorporado à matéria orgânica do solo (MOS), de 95 a 99% do N total encontra-se em formas orgânicas (proteínas, aminoácidos livres, açúcares aminados e outros complexos) e não prontamente disponíveis para as plantas (DIAS et al., 1992). As formas orgânicas de N devem ser primeiro mineralizadas, liberando N nas formas inorgânicas (principalmente NH_4^+ e NO_3^-) para depois serem absorvidas pelas plantas (MOREIRA e SIQUEIRA, 2006).

A mineralização ocorre à medida que os microrganismos decompõem o material orgânico para o suprimento de sua demanda de energia e de nutrientes essenciais. Quando os microrganismos usam todo o nutriente que necessitavam, o excesso é liberado no solo e fica

disponível para as plantas (LOPES, 1998). O processo de mineralização ocorre através de três reações sucessivas: aminação, amonificação e nitrificação (BARROS et al., 2011). A aminação e a amonificação são realizadas por microrganismos heterotróficos que têm como fonte de energia o carbono, enquanto que a nitrificação depende de microrganismos autotróficos, nos quais a energia provém da oxidação de sais inorgânicos e da carboxilação do CO_2 do ar.

A aminação é o processo de fracionamento da MOS que, em ambientes neutros e alcalinos, é realizado predominantemente por bactérias, porém com auxílio de fungos e actinomicetos (DIAS et al., 1992). Por sua vez, em ambientes ácidos, os fungos têm ação predominante. As bactérias e fungos 'atacam' o material orgânico numa sequência, de forma que os produtos de uns servem como substratos para outros. Como resultado da decomposição do material orgânico nitrogenado, há digestão enzimática de proteínas e compostos afins, com liberação de aminas e aminoácidos.

Na amonificação as aminas e aminoácidos liberados no processo anterior são 'atacados' por bactérias, fungos e actinomicetos que liberam compostos amoniacais, principalmente íons NH_4^+ (DIAS et al., 1992). O NH_4^+ formado pode passar por um destes processos: ser absorvido diretamente pelas raízes das plantas; ser imobilizado por organismos heterotróficos (para decomposição de outros resíduos orgânicos); ser adsorvido por forças eletrostáticas na superfície de argilas 1:1 e 2:1 (tomando parte do complexo sortivo do solo); ou ser convertido para NO_2^- e NO_3^- por meio da nitrificação.

A nitrificação é o processo no qual o NH_4^+ produzido na fase de amonificação (ou adicionado via fertilizantes) é oxidado para NO_3^- em duas etapas: primeiro o NH_4^+ é convertido para NO_2^- , principalmente por bactérias autotróficas do gênero *Nitrosomonas*; em seguida, o NO_2^- é transformado para NO_3^- por bactérias autotróficas *Nitrobacter* (DIAS et al., 1992). Por se tratar de reações microbiológicas, são altamente influenciadas pelas condições ambientais. As condições ideais para o processo de nitrificação compreendem temperaturas entre 25 e 35 °C, pH 5,5 a 10,0 (ótimo de $\pm 8,5$) e umidade intermediária. Como esta reação requer oxigênio (O_2), ela ocorre de forma mais rápida em solos bem aerados. Além disso, considerando que na nitrificação cada molécula de NH_4^+ libera duas moléculas de H^+ , este processo gera acidez no solo. O NO_3^- produzido pode passar pelos seguintes processos: ser absorvido pelas raízes das plantas; ser imobilizado por microrganismos; ser perdido por lixiviação, por desnitrificação (reduzido para compostos nitrogenados gasosos) ou por volatilização.

O processo de imobilização do N é o reverso da mineralização, e ambos os processos ocorrem no solo de forma simultânea (LOPES, 1998). A relação carbono/nitrogênio (C/N) dos materiais orgânicos determina a sua taxa de decomposição no solo (VICTORIA et al., 1992). O equilíbrio entre imobilização e mineralização de N ocorre quando a relação C/N está na faixa de 20/1 a 30/1. Relação C/N abaixo de 20/1 indica mineralização de N enquanto que na relação C/N maior do que 30/1 há predomínio da imobilização de N. A relação C/N diminui quando ocorre o processo de decomposição da matéria orgânica, uma vez que durante a respiração parte do C orgânico se perde na forma de CO₂. Usualmente, quando a concentração de N em resíduos orgânicos é menor do que 1,5% ocorre favorecimento da imobilização de N pela biomassa microbiana, resultando na redução da concentração do N disponível no solo (CANTARELLA, 2007). O N inorgânico é imobilizado pelos microrganismos para compor as proteínas de seus tecidos, e pode tornar-se novamente disponível às plantas quando os microrganismos se decompõem (LOPES, 1998).

A qualidade do material orgânico influencia a mineralização. A presença de lignina e polifenóis proporciona correlações negativas com a taxa de mineralização do N orgânico (MOREIRA e SIQUEIRA, 2006). A aplicação de fertilizantes nitrogenados juntamente com o material orgânico a ser incorporado no solo é uma prática que estimula a sua decomposição, principalmente quando a relação C/N do material é muito alta. A oxigenação do solo é outro fator que influencia a taxa de mineralização. Em ambientes alagados (redutores), a decomposição da MOS é lenta e incompleta, de forma que a liberação do N ocorre na forma de NH₄⁺ (DIAS et al., 1992).

O N também é perdido do solo por meio do processo de desnitrificação, que corresponde à redução do NO₂⁻ ou NO₃⁻ a N gasoso (N₂ e N₂O) (DIAS et al., 1992). Estima-se a nível global que, no período de um ano, são perdidos entre 15 a 18 x 10⁷ toneladas de N por meio deste processo, que é realizado por microrganismos desnitrificantes heterotróficos (*Pseudomonas*, *Micrococcus*, *Achromobacter*, *Bacillus*, *Thiobacillus denitrificans* e *T. thioparus*), sendo, em sua maioria, anaeróbios facultativos. Esses microrganismos usam preferencialmente o O₂ como receptor final de elétrons, mas em condições de ausência de O₂ (principalmente em solos alagados) também podem utilizar NO₂⁻ e NO₃⁻, resultando na liberação de N₂ e N₂O, em proporções variáveis de acordo com as condições do ambiente. Este processo ocorre em quatro etapas, com reduções sucessivas do N. No solo, o N₂O é instável, portanto, ele é reduzido a N₂ durante a sequência de reações de desnitrificação. Uma vez que a desnitrificação consome prótons e alcaliniza o solo, ela reverte parte da acidez produzida pela nitrificação. O pH ideal para a sua ocorrência está na faixa de 6 a 8, sendo que

em pH abaixo de 4 o processo pode cessar. A temperatura ótima para realização deste processo é de 30 °C.

Presente na solução do solo, o NO_3^- pode ser facilmente absorvido pelo sistema radicular das plantas ou lixiviado para horizontes mais profundos, podendo contribuir para o aumento dos níveis de nitrato e eutrofização das águas (TRENKEL, 2010). Quando o fluxo de água ao longo do perfil do solo percola o N a uma profundidade além daquela explorada pelo sistema radicular, consideramos que ocorre a perda do nutriente por lixiviação (BARTH, 2009). No processo de perda de N por lixiviação, o ânion NO_3^- apresenta alta mobilidade no perfil do solo, por isso, a lixiviação de N pode ser intensa em solos com boa drenagem (DIAS et al., 1992). Por sua vez, o cátion NH_4^+ fica retido nas cargas negativas dos colóides, no complexo sortivo ou capacidade de troca catiônica (CTC), tornando a sua movimentação no solo muito menor do que NO_3^- , principalmente em solos tropicais intemperizados onde há predomínio de cargas negativas. Deste modo, o manejo da adubação nitrogenada deve ser feito evitando a aplicação do nutriente em períodos de baixa demanda por parte da cultura, principalmente em estações com chuvas intensas.

A baixa eficiência da adubação nitrogenada nem sempre está associada às perdas por lixiviação (CABALLERO et al., 1986). Por exemplo, Bortolotto et al. (2012), em experimento realizado com fertirrigação nitrogenada em solos arenosos cultivados com café, demonstraram perdas de apenas 3,7% do N total aplicado (dose de $400 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) devido à lixiviação do nutriente. Oliveira et al. (2002), em experimento com lisímetro realizado na cultura da cana-de-açúcar, constataram perdas médias de N por lixiviação de $4,5 \text{ kg ha}^{-1}$ durante 11 meses, enquanto que as perdas por lixiviação de potássio, cálcio e magnésio foram de 13, 320 e 80 kg ha^{-1} , respectivamente. Além disso, as perdas de N por lixiviação não foram provenientes da fertilização com ureia.

Para o trigo cultivado em um Latossolo Vermelho Escuro, Boaretto et al. (2004) encontraram perdas por lixiviação de NO_3^- de aproximadamente 1% do N total aplicado na forma de ureia. Entretanto, as perdas por volatilização de NH_3 (demonstradas no mesmo experimento) foram de 13% em condição irrigada, chegando a 39% em condições de sequeiro.

A volatilização é o principal processo de perda de N (na forma gasosa de NH_3) no solo (DIAS et al., 1992). Em condições aeróbias e alcalinas, o NH_4^+ (presente no solo ou adicionado via fertilizantes) é convertido em NH_3 :



Em solos agrícolas, as perdas gasosas de N (por desnitrificação e volatilização) podem atingir 80% do N aplicado como fertilizante, embora, na maioria dos casos esses valores situem-se entre 25 e 30%, podendo representar de 30 a 200 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N, dependendo da cultura, do solo, da fonte de fertilizante nitrogenado utilizado, dentre outros fatores ambientais (MOREIRA e SIQUEIRA, 2006).

A ocorrência da volatilização depende da existência de NH₄⁺ (proveniente do solo ou adicionado via fertilizante) e é influenciada por fatores como pH, teor de carbonato de cálcio, CTC, textura, temperatura e umidade, além de aspectos de manejo como quantidade de N aplicado e incorporação ou não do fertilizante no solo.

Sangoi et al. (2003) concluíram que a volatilização de NH₃ é maior e mais rápida em solo arenoso do que em solo argiloso. As perdas de NH₃ são maiores no solo arenoso devido ao maior tamanho de suas partículas (ou seja, menor superfície específica) e menor CTC, que resultam em menor capacidade de retenção de NH₄⁺ (RAWLUK et al., 2001).

O aumento da temperatura favorece as perdas de NH₃. Em condições de laboratório, a perda por volatilização de N-NH₃ oriunda da ureia aplicada na superfície do solo aumentou em 30% quando a temperatura variou de 18 para 35 °C (TASCA et al., 2011). Além disso, a umidade influencia as perdas de NH₃. Em solos com umidade próxima à capacidade de campo, as perdas de NH₃ acompanham o processo de evaporação da água. Por sua vez, quando a ureia é aplicada em solo seco, as perdas por volatilização são insignificantes até que haja umidade suficiente para desencadear o processo de hidrólise do fertilizante. A ausência de volatilização após a aplicação da ureia em solo seco foi observada por um período de até 12 dias com volume acumulado de chuva inferior a 10 mm (MIRA et al., 2017). Sendo assim, para determinação do momento adequado da aplicação da ureia, é mais importante considerar a taxa de evaporação do que a umidade inicial, pois o processo de secagem do solo potencializa as perdas de NH₃ (LARA CABEZAS et al., 1997).

A incorporação da ureia ao solo é a melhor estratégia para prevenir o processo de perda de NH₃ por volatilização (TASCA et al., 2011), pois aumenta o contato do fertilizante com o solo, favorecendo a adsorção do NH₄⁺ formado às cargas negativas do solo (SANGOI et al., 2003). Em sistemas de plantio direto, a incorporação da ureia ao solo reduz as perdas por volatilização de NH₃ a valores próximos a 2% do N total aplicado (LARA CABEZAS et al. 1997).

2.4. Fertilização nitrogenada do trigo

O uso de fertilizantes nitrogenados em culturas não-leguminosas, como o trigo, corresponde a um dos mais altos custos de produção agrícola (SALA et al., 2005). De acordo com informações da Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento do Paraná (SEAB, 2020), o gasto estimado com fertilizantes na safra de 2020 foi de 18,4% do custo total da produção da lavoura de trigo, sendo que aproximadamente metade deste valor corresponde a adubos nitrogenados.

O N constitui o nutriente mais limitante da produtividade do trigo (SALA et al., 2005). O aumento da concentração de N nas folhas proporciona aumento da produtividade por ter correlação positiva com o aumento do número de grãos por espiguetas, grãos por espiga e massa de grãos por espiga (BENETT et al., 2011).

Para minimizar as perdas de fertilizantes nitrogenados é necessário adequar a aplicação do N às necessidades da cultura, considerando as características de cada fertilizante e o momento correto para sua utilização (CHIEN et al., 2009). No caso de perdas de N por lixiviação, o ideal é parcelar a adubação, de modo que o N seja fornecido próximo aos períodos que antecedem maiores demandas e quando as plantas apresentem o sistema radicular suficientemente desenvolvido, com capacidade para absorver o nutriente (CANTARELLA e MARCELINO, 2008). Por sua vez, perdas de N por volatilização podem ser minimizadas por meio da incorporação dos adubos no solo em uma profundidade de 3 a 5 cm, seja mecanicamente ou pela água da irrigação. Também podem ser utilizados fertilizantes com maior eficiência agronômica, como aqueles de liberação lenta ou controlada de nutrientes. Reduzir as perdas de N é importante para a proteção do meio ambiente (redução da contaminação de aquíferos) e para aumentar os rendimentos agrícolas por meio do uso eficiente dos fertilizantes nitrogenados (TRENKEL, 2010).

A demanda nutricional por N de uma cultura depende de vários fatores, como diferenças no requerimento genético de cada cultivar, práticas culturais e condições climáticas (BRAZ et al., 2006). Frequentemente, em condições de cultivo comercial, a quantidade necessária de N não é suprida nos adequados estádios fenológicos, isto é, quando há maior demanda das plantas pelo nutriente. Bredemeier e Mundstok (2001) observaram na cultura do trigo que o N deve estar disponível no solo preferencialmente entre a emergência das plântulas e a emissão da sétima folha do colmo principal. Isto se deve ao fato de que, para estabelecer o número de espiguetas diferenciadas (e o número de grãos por espiga) há grande

demanda de N no início desse período. Por volta da emissão da sétima folha o N se torna crítico para determinar o número de colmos sobreviventes e produtores de espigas férteis.

Em sistema de plantio direto, o suprimento de N é mais complexo devido à quantidade e qualidade dos resíduos da cultura anterior, que podem imobilizar ou disponibilizar N para a cultura seguinte (WENDLING et al., 2007). Com relação às doses de N para a cultura do trigo no Paraná, Foloni et al. (2016) indicam a quantidade de 30 a 40 kg ha⁻¹ de N na semeadura e complemento com 0 a 120 kg ha⁻¹ de N em cobertura, dependendo do tipo de palhada anterior (milho ou soja), da taxa de mineralização da matéria orgânica (em função da temperatura/altitude) e da responsividade nutricional de cada material genético (cultivares com baixa e alta resposta ao N).

2.5. Fertilizantes nitrogenados

O processo de síntese de NH₃ a partir da reação do N₂ e H₂ atmosféricos, em condições de alta temperatura e pressão e na presença de ferro, é considerado o maior avanço na indústria de fertilizantes desde o século XX (LOPES et al., 2007; ERISMAN et al., 2008). A partir desse processo, foi possível a produção de ureia, nitrato de amônio, nitrato de cálcio, sulfato de amônio, monoamônio fosfato (MAP) e diamônio fosfato (DAP), que são os principais fertilizantes nitrogenados utilizados na agricultura mundial e têm NH₃ como matéria-prima essencial para sua produção (GUELFY, 2017).

O processo de fabricação de fertilizantes nitrogenados envolve diferentes rotas tecnológicas e possibilidades de matéria-prima, como gás natural, gás de refinaria e resíduo asfáltico (LIMA, 2007). O gás natural é utilizado de forma intensiva, uma vez que os fertilizantes nitrogenados são derivados da NH₃, obtida a partir da transformação química do gás natural (EPE, 2019).

A produção de fertilizantes no mundo utiliza 1,2% de todo o consumo mundial de energia, sendo que a produção de nitrogenados ocupa 92,5% desse valor (FRANCO e SARAIVA NETTO, 2007). A maior parte dessa energia é voltada para a produção de NH₃, matéria-prima para produção da maioria dos fertilizantes nitrogenados.

No Brasil, das quatro plantas industriais de NH₃ existentes, duas utilizam gás natural como matéria-prima, ambas pertencentes à Petrobras, e localizam-se na Bahia. As outras duas unidades, pertencentes à Ultrafértil, estão localizadas em São Paulo e no Paraná e utilizam gás de refinaria e resíduo asfáltico, respectivamente (FRANCO e SARAIVA NETTO, 2007).

Os teores de nutrientes e as fórmulas moleculares dos principais fertilizantes nitrogenados, bem como o preço médio pago pelo consumidor no estado do Paraná em 2019, encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química, teores de nutrientes e preço médio de fertilizantes nitrogenados na safra 2019 no Paraná.

Fertilizante ¹	Fórmula molecular ⁽¹⁾	Garantias (composição) ⁽¹⁾	Preço médio por tonelada (R\$ Mg ⁻¹)	Custo unitário (R\$ kg ⁻¹ de N)
Ureia	CO(NH ₂) ₂	45% de N	1729,45 ⁽²⁾	3,84
Nitrato de amônio	NH ₄ NO ₃	33% de N	1798,40 ⁽²⁾	5,45
Sulfato de amônio	(NH ₄) ₂ SO ₄	20% de N + 24% de S	1.500,00 ⁽²⁾	7,50
Monoamônio fosfato (MAP)	NH ₄ H ₂ PO ₄	10% de N + 52% de P ₂ O ₅	1922,50 ⁽²⁾	19,22
Diamônio fosfato (DAP)	(NH ₄) ₂ HPO ₄	18% de N + 45% de P ₂ O ₅	1261,19 ⁽³⁾	7,01

Fonte: adaptado de ⁽¹⁾Trani e Trani (2011), ⁽²⁾CONAB (2020b), ⁽³⁾Index Mundi (2019).

O nitrato de amônio (NH₄NO₃) contém 33% de N, sendo produzido como uma solução concentrada a partir da reação do gás NH₃ com ácido cítrico e, posteriormente, solidificado em forma de grânulos. O NH₄NO₃ é adequado para fertirrigação e aplicação foliar devido à sua elevada solubilidade (REETZ, 2017), sendo também uma fonte segura para ser utilizada na forma de grânulos no momento da semeadura (FOLONI et al., 2014). Entretanto, ele apresenta custo unitário (por unidade de N) cerca de 42% maior do que a ureia (CONAB, 2020b).

O sulfato de amônio [(NH₄)₂SO₄] contém 20% de N, sendo um dos fertilizantes nitrogenados manufaturados mais antigos, considerado como um subproduto industrial, pois é obtido da fabricação do aço, nylon e outros processos que utilizam o ácido sulfúrico (REETZ, 2017). Ele também contém 24% de S, tornando-o uma alternativa de uso quando se necessita fornecer esse nutriente sulfatado.

A ureia [CO(NH₂)₂] é o fertilizante nitrogenado mais utilizado na agricultura brasileira (TEIXEIRA FILHO et al., 2010b). Esse fertilizante é solúvel em água e, após sofrer transformações químicas (Figura 2), libera rapidamente o N no solo, principalmente na forma de NH₄⁺, que está prontamente disponível para ser absorvida pelas plantas ou ser perdida por volatilização ou lixiviação (CANTARELLA e MARCELINO, 2008). A ureia se destaca como

fonte de N devido à sua produção a partir de NH_3 e CO_2 , o que torna o produto menos oneroso do que os demais fertilizantes nitrogenados. Além disso, a ureia possui alta concentração de N (45%), que reduz o custo com transporte e armazenagem, tornando o custo por tonelada de N mais atrativo. Este fertilizante pode ser utilizado na forma de grânulos ou como fertilizante líquido, sendo comercializado como elemento simples (somente N) ou em misturas com outros nutrientes (FRANCO e SARAIVA NETTO, 2007; FRAZÃO et al., 2014). Em 2017 o Brasil produziu 836.754 toneladas de ureia e importou 4.769.793 toneladas deste fertilizante, portanto, ele não é autossuficiente para atender às demandas do mercado consumidor (ANDA, 2018).

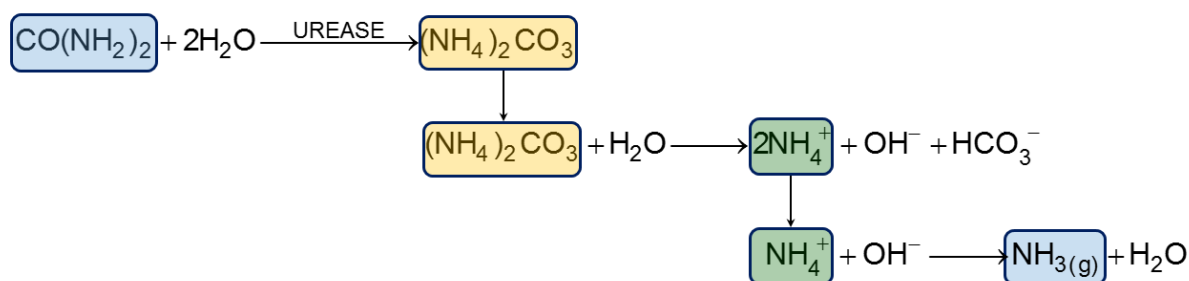


Figura 2: Representação esquemática da volatilização da amônia (NH_3) a partir da adubação com ureia [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$]. Fonte: adaptado de Dias et al. (1992).

A adubação nitrogenada na forma de ureia pode resultar em maiores perdas de N por volatilização, devido à reação deste fertilizante com enzimas do solo (DIAS et al., 1992). A enzima urease (ureia amido-hidrolase, EC 3.5.1.5), produzida pelas plantas, microrganismos (bactérias, fungos e actinomicetos) e alguns membros da fauna do solo, catalisa a hidrólise da ureia, sendo amplamente distribuída na natureza (KANDELER e GERBER, 1988). Sua hidrólise resulta na formação de carbonato de amônio [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow (\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$], que é rapidamente decomposto em NH_4^+ , bicarbonato (HCO_3^-) e hidroxila (OH^-) [$(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NH}_4^+ + \text{HCO}_3^- + \text{OH}^-$], sendo o NH_4^+ passível de ser convertido em NH_3 que é perdido por volatilização (TASCA et al., 2011) (Figura 2).

Produzida no ambiente do solo ou proveniente de restos vegetais, a urease é uma enzima extracelular, e sua atividade no solo pode indicar o potencial de conversão do N orgânico em mineral pelo processo de mineralização (LANNA et al., 2010). No contexto agrícola, a atividade da urease ocorre de forma generalizada no ambiente, principalmente em solos onde há utilização de fertilizantes nitrogenados. A atividade da enzima urease no solo é influenciada pelo preparo do solo e pela palhada da cultura anterior. Solos cultivados com

gramíneas (como cultura de cobertura) geralmente apresentam maior atividade de urease quando comparados com solos cultivados anteriormente com leguminosas (LANNA et al., 2010). Isto provavelmente ocorre devido à alta relação C/N dos restos vegetais das gramíneas, que promove maior diversidade de microrganismos e melhor ação de enzimas que influenciam a decomposição do material orgânico.

A maioria do N presente no solo, de forma natural ou adicionado via fertilização, encontra-se em estruturas orgânicas cuja hidrólise é dependente da atividade de diversas hidrolases amídicas, dentre elas a enzima urease (LANNA et al., 2010). Uma vez que a atividade desta enzima apresenta correlação positiva com o teor de matéria orgânica do solo, fica evidente que solos cultivados sob sistema plantio direto apresentam maior atividade da urease do que solos sob cultivo convencional (SOARES, 2011). Quando a ureia é aplicada em superfície, as perdas de NH_3 podem ser cerca de 47% maiores sob sistema plantio direto do que sob plantio convencional (LARA CABEZAS et al., 1997).

A atividade da urease é influenciada pela temperatura e umidade. Longo e Melo (2005) analisando a atividade da urease em ambientes cultivados com culturas anuais (soja e milho) e perenes (eucalipto, pinus e citros), observaram maior hidrólise da ureia nos meses mais quentes e úmidos, independente da cultura instalada.

Como discutido anteriormente, a ureia apresenta elevada suscetibilidade à volatilização de NH_3 , principalmente em países de clima tropical, como o Brasil (FRAZÃO et al., 2014). Com o intuito de diminuir essas perdas de N por volatilização, novas tecnologias têm sido desenvolvidas para aumentar a eficiência da ureia, tais como incorporação e/ou revestimento dos grânulos do fertilizante com micronutrientes, recobrimento com polímeros que interferem na hidrólise e solubilização, e a mistura com fertilizantes ácidos como, por exemplo, o sulfato de amônio. Entretanto, o uso de ureia em conjunto com inibidores de urease [principalmente o N-(n-butil) tiofosfórico triamida – NBPT] consiste na principal tecnologia voltada para a diminuição de perdas de NH_3 (OLIVEIRA et al., 2014), como será detalhado a seguir.

2.6. Inibidores de urease

O uso de fertilizantes nitrogenados em quantidades excessivas ou em situações desfavoráveis pode ocasionar perdas de N. Uma alternativa para maximizar o aproveitamento desses insumos pelas plantas é a utilização de fertilizantes com maior eficiência, classificados como fertilizantes de liberação lenta (ou controlada) e fertilizantes estabilizados. De maneira

geral, prevalece no mercado os fertilizantes estabilizados, devido ao seu custo mais competitivo (CANTARELLA e MARCELINO, 2008).

Dentre os fertilizantes estabilizados, destaca-se o uso dos inibidores de nitrificação, como dicianodiamida (DCD), fosfato de 3,4 dimetilpirazol (DMPP) e a nitrapirina; e inibidores de urease, como NBPT, phenylphosphorodiamidate (PPD/PPDA) e hydroquinona. Atualmente, o uso de inibidores de nitrificação e de urease fazem parte das boas práticas de manejo de fertilizantes (TRENKEL, 2010).

Alguns elementos químicos também foram avaliados para reduzir a atividade da urease, destacando-se metais como Ag, Hg, Cu, Cd, Co e Zn, conhecidos por inibir a hidrólise da ureia quando utilizados como aditivos neste fertilizante (CANTARELLA et al., 2018).

Com relação à eficiência, Dominguez et al. (2008) destacam as fosforotriamidas como compostos inibidores de urease. Estas substâncias possuem grupos funcionais que contêm P=O ou P=S ligados a pelo menos uma amina (NH_2) livre para reagir com os sítios ativos da urease.

Para culturas extensivas, como o milho e o trigo, o uso de fertilizantes estabilizados contendo inibidores de urease apresenta maior expressão comercial (CANTARELLA e MARCELINO, 2008). Comparado à ureia convencional, o custo da ureia tratada com inibidores de urease é cerca de 10 a 30% maior (GUELFI, 2017).

O NBPT destaca-se entre os produtos comerciais de inibidores de urease. Quando comparado aos inibidores benzimidazol e benzoiltiourea, o NBPT se mostrou superior, tanto na diminuição da quantidade de NH_3 perdido quanto no retardamento do pico de volatilização após a aplicação dos insumos (BARBERENA et al., 2019). O NBPT é dissolvido em solvente não aquoso (normalmente propilenoglicol) acrescido de corantes que auxiliam na identificação do fertilizante tratado (GUELFI, 2017). O produto comercial é aplicado revestindo os grânulos de ureia, e a sua eficiência na diminuição da atividade da urease está relacionada com a concentração do inibidor e sua distribuição uniforme ao redor dos grânulos do fertilizante (ABALOS et al., 2012). Fatores bióticos e abióticos influenciam a taxa de conversão do NBPT em seu análogo NBPTO e, portanto, influenciam a estabilidade do inibidor no solo (WATSON et al., 2008).

Diversos estudos foram realizados para avaliar o NBPT com relação à sua capacidade de redução de perdas de ureia por volatilização de NH_3 , e o consequente aumento de produtividade das principais culturas agrícolas devido ao melhor aproveitamento da fertilização nitrogenada. Silva et al. (2017) realizaram uma meta-análise sobre o uso de NBPT na agricultura, contemplando trabalhos científicos publicados no período de 1990 a 2014,

considerando 35 estudos e 121 observações correspondentes às perdas de NH_3 , e mais 25 estudos e 87 observações em que foram consideradas a produtividade das culturas. Nesta meta-análise, os autores concluíram que a utilização de NBPT no tratamento da ureia resultou em uma redução média de 52% das perdas de N por volatilização de NH_3 e um aumento potencial de 5,3% no rendimento das principais culturas agrícolas em diferentes condições de solo. Segundo Lana et al. (2018), a adição de NBPT à ureia pode reduzir em até 75% as perdas por volatilização de NH_3 . Ribeiro (2018) observou que a adição de NBPT à ureia pode reduzir as perdas por volatilização de NH_3 de 30% (na testemunha sem NBPT) para menos de 5% do total de N aplicado.

A ureia estabilizada com NBPT tem o seu pico de volatilização retardado, aumentando a oportunidade de o fertilizante ser incorporado ao solo por chuva ou irrigação. Isto ocorre porque o NBPT, ao ocupar o local de atuação da enzima urease, promove redução da hidrólise da ureia aplicada na superfície do solo, reduzindo o processo de volatilização, resultando no aumento da eficiência da adubação nitrogenada (WATSON et al., 2008). O NBPT tem sua ação reduzida à medida que se degrada e é substituído pela enzima urease nos sítios de ligação da ureia (RAWLUK et al., 2001).

A utilização da substância NBPT não demonstrou riscos ambientais ou de segurança pessoal, não sendo necessário nenhum cuidado especial além dos procedimentos básicos de segurança que devem ser tomados durante o manuseio e uso de fertilizantes (TRENKEL, 2010).

Os fertilizantes nitrogenados que contém NBPT podem ser aplicados em pré-instalação da lavoura, junto com a semeadura, em pré-emergência das plântulas, ou em outras operações de adubação de cobertura, apresentando maiores benefícios—quanto à redução da volatilização de NH_3 —quando o fertilizante é aplicado em superfície, sem incorporação imediata ao solo (TRENKEL, 2010). Dependendo das condições ambientais, como temperatura e umidade, a hidrólise da ureia pode ser inibida pelo uso do NBPT por períodos de três a 14 dias (CANTARELLA et al., 2008). Maiores taxas de volatilização de NH_3 ocorrem logo nos primeiros dias após a aplicação da ureia pura (TASCA et al., 2011; SILVA et al., 2017; LANA et al., 2018). Com a adição do NBPT, é possível postergar o pico de volatilização da ureia em três ou quatro dias (SILVA et al., 2017; LANA et al., 2018), sendo que esse retardo pode ser suficiente para diminuir de forma significativa as perdas de N por volatilização até que o fertilizante seja incorporado ao solo pela chuva ou pela irrigação (ESPINDULA et al., 2010). Otto et al. (2017) relataram que a adição de NBPT à ureia reduziu em aproximadamente 21% as perdas de N, em comparação ao uso de ureia pura; entretanto, as

perdas do N aplicado na cultura ainda podem chegar à 14% da dose total, indicando que o NBPT não é capaz de controlar totalmente as perdas por volatilização. Barberena et al. (2019), em experimento realizado em um Latossolo Vermelho de textura argilosa e em um Latossolo Amarelo de textura muito argilosa, concluíram que as perdas por volatilização de NH_3 (acumuladas num período de 384 horas) foram aproximadamente 80% menores quando utilizou-se ureia tratada com NBPT, comparada com ureia pura. Entretanto, houve aumento significativo das perdas de N por volatilização no oitavo ou no décimo segundo dia após a aplicação da ureia tratada com NBPT no Latossolo Vermelho ou no Latossolo Amarelo, respectivamente, indicando que a ação de inibição é influenciada pelo tempo de exposição às condições ambientais e pelo tipo de solo.

Outro aspecto importante a ser considerado é o máximo período de tempo de armazenamento ('vida de prateleira') da ureia tratada com NBPT, no qual o inibidor de urease permanece ativo. Segundo Soares (2011), após a realização do tratamento com NBPT, a ureia pode ficar armazenada por um período de três meses, considerando a temperatura de 25 °C, ou por um mês a 35 °C, de modo que não haja prejuízos relacionados à eficiência do inibidor. No entanto, são muito escassos os estudos científicos realizados para validar a eficiência do NBPT em função das condições ambientais vigentes durante o período de armazenamento pós tratamento da ureia.

Embora apresentem limitações quanto à capacidade de redução de perdas por volatilização de N, o uso de inibidores de urease, como o NBPT, apresenta-se como uma alternativa que deve ser considerada, tendo em vista a crescente participação da ureia no mercado de fertilizantes (CHIEN et al., 2009).

REFERÊNCIAS

ABALOS, D.; SANZ-COBENA, A.; MISSELBROOK, T.; VALLEJO, A. Effectiveness of urease inhibition on the abatement of ammonia, nitrous oxide and nitric oxide emissions in a non-irrigated Mediterranean barley field. **Chemosphere**, Amsterdam, v. 89, p. 310–318, 2012.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS — ANDA. **Pesquisa Setorial**; 2018. Disponível em: www.anda.org.br.

BACALTCHUK, B.; CHAVES, M. S.; LIMA, M. I. P. M.; COSTAMILAN, L. M.; MACIEL, J. L. N.; SALVADORI, J. R.; GAMBATTO, A. **Características e cuidados com algumas doenças do trigo**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2006. 11 p. (Documentos Online, 64)

BALIGAR, V. C.; FAGERIA, N. K.; HE, Z. L. Nutrient use efficiency in plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, London, v. 32, p. 921–950, 2001.

BARBERENA, I. M.; ESPINDULA, M. C.; ARAÚJO, L. F. B.; MARCOLAN, A. L. Use of urease inhibitors to reduce ammonia volatilization in Amazonian soils. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 54, e00253, 2019.

BARROS, F. M.; MARTINEZ, M. A.; MATOS, A. T.; ROCHA, F. A.; SILVA, D. P. Mineralização de nitrogênio em dejetos de suínos. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 7, n. 12, p. 1–12, 2011.

BARTH, Gabriel. **Inibidores de urease e de nitrificação na eficiência de uso de adubos nitrogenados**. 2009. 78 f. Tese (Doutorado em Agronomia)—Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz, Piracicaba, 2009.

BENETT, C. G. S.; BUZZETTI, S.; SILVA, K. S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; ANDREOTTI, M.; ARF, O. Aplicação foliar e em cobertura de nitrogênio na cultura do trigo no cerrado. **Semina-Ciências Agrárias**, Londrina, v. 32, n. 3, p. 829–838, 2011.

BOARETTO, A. E.; SPOLIDORIO, E. S.; FREITAS, J. G.; TRIVELIN, P. C. O.; MURAOKA, T.; CANTARELLA, H. Fate of ^{15}N -urea applied to wheat-soybean succession crop. **Bragantia**, Campinas, v. 63, n. 2, p. 265–274, 2004.

BORTOLOTTI, R. P.; BRUNO, I. P.; REICHARDT, K.; TIMM, L. C.; AMADO, T. J. C.; FERREIRA, A. O. Nitrogen fertilizer (^{15}N) leaching in a central pivot fertigated coffee crop. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 59, n. 4, p. 466–475, 2012.

BRAZ, A. J. B. P.; SILVEIRA, P. M.; KLIEMANN, H. J.; ZIMMERMANN, F. J. P. Adubação nitrogenada em cobertura na cultura do trigo em sistema de plantio direto após diferentes culturas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 30, n. 2, p. 193–198, 2006.

BUTRINOWSKI, R. T. **Novas tecnologias para o controle da giberela do trigo na safra 2014 no sudoeste do Paraná**. 2015. 49 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)—Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2015.

BREDEMEIER, C.; MUNDSTOK, C. M. Estádios fenológicos do trigo para a adubação nitrogenada em cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 317–323, 2001.

BREDEMEIER, C.; MUNDSTOK, C. M. Regulação da absorção e assimilação do nitrogênio nas plantas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 2, p. 365–372, 2000.

CABALLERO, S. S. U.; LIBARDI, P. L.; REICHARDT, K.; MORAES, S. O.; VICTORIA, R. L. Lixiviação do nitrogênio proveniente do solo e do fertilizante $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ durante o ciclo de uma cultura de feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 21, n. 1, p. 25–31, 1986.

CANCELLIER, E. L. **Eficiência da ureia estabilizada e de liberação controlada no milho cultivado em solo de fertilidade construída**. 2013. 75 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)–Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O.; CONTIN, T. L. M.; DIAS, F. L. F.; ROSSETTO, R.; MARCELINO, R.; COIMBRA, R. B.; QUAGGIO, J. A. Ammonia volatilisation from urease inhibitor-treated urea applied to sugarcane trash blankets. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, n. 4, p. 397–401, 2008.

CANTARELLA, H.; MARCELINO, R. Fontes alternativas de nitrogênio para a cultura do milho. In: ABDALLA, S. R. S.; PROCHNOW, L. I.; FANCELLI, A. L. (Org.). **Informações Agronômicas 122**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2008. p. 12–14.

CANTARELLA, H.; OTTO, R.; SOARES, J. R.; SILVA, A. G. B. Agronomic efficiency of NBPT as a urease inhibitor: A review. **Journal of Advanced Research**, Amsterdam, v. 13, p. 19–27, 2018

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2007. p. 375–470.

CHIEN, S. H.; PROCHNOW, L. I.; CANTARELLA, H. Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts. In: SPARKS, D. (Org.). **Advances in Agronomy**. Burlington: Academic Press, 2009. p. 267–322.

COMPANHIA NACIONAL DO ABASTECIMENTO — CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. Brasília, CONAB, 2020a. Disponível em <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em 12/05/2020

COMPANHIA NACIONAL DO ABASTECIMENTO — CONAB. **Insumos Agropecuários**. Brasília, CONAB; 2020b. Disponível em: <https://consultaweb.conab.gov.br/consultas/consultaInsumo.do?d-6983528-p=2&uf=PR&ano=2020&method=acaoListarConsulta&idSubGrupo=71&btnConsultar=Consultar&jcaptcha=wfn7&idGrupo=27>. Acesso em: 12/05/2020.

DIAS, L. E.; BARROS, N. F.; FRANCO, A. A. **Curso de fertilidade e manejo do solo**. Módulo 6 - Nitrogênio. Brasília: Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior, 1992.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA — EPE. **Competitividade do gás natural: estudo de caso na indústria de fertilizantes nitrogenados**. Brasília: Ministério de Minas e Energia; 2019. Disponível em: <http://www.epe.gov.br>. Acesso em: 10/11/2019.

ERISMAN, J. W.; SUTTON, M. A.; GALLOWAY, J.; KLIMONT, Z.; WINIWARTER, W. How a century of ammonia synthesis changed the world. **Nature Geoscience**, New York, v. 1, p. 636–639, 2008.

ESPINDULA, M. C. **Inibidor de urease (NBPT) e a eficiência da uréia na fertilização do trigo irrigado**. 2010. 70f. Tese (Doutorado em Agronomia)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. Lavras: Universidade Federal de Lavras/Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão, 2005. 186 p.

FOLONI, J. S. S.; BASSOI, M. C.; OLIVEIRA JUNIOR, A., CASTRO C. **Fontes e doses de nitrogênio na adubação de semeadura do trigo no Paraná**. Londrina: Embrapa Soja, 2014. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 8).

FOLONI, J. S. S.; BASSOI, M. C.; SILVA, S. R. **Indicações fitotécnicas para cultivares de trigo da Embrapa no Paraná**. Londrina: Embrapa Soja, 2016. 23 p. (Circular técnica, 117).

FRANCO, F. A.; PINTO, R. J. B.; SCAPIM, C. A.; SCHUSTER, I.; PREDEBON, C. T.; MARCHIORO, V. S. Tolerância à germinação na espiga em cultivares de trigo colhido na maturação fisiológica. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 9, p. 2396–2401, 2009.

FRANCO, J. A. M.; SARAIVA NETTO, A. Produção de fertilizantes nitrogenados e suprimento de matéria prima. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S.; VITTI, G. C. (Org.). **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2007. p. 73–107.

FRAZÃO, J. J.; SILVA, A. R.; SILVA, V. L.; OLIVEIRA, V. A.; CORRÊA, R. S. Fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada e ureia na cultura do milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 12, p. 1262–1267, 2014.

GUELFÍ, D. **Fertilizantes nitrogenados estabilizados, de liberação lenta ou controlada**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2017. p. 1–14. (Informações Agronômicas, 157)

HOPKINS, W. G. **Introduction to Plant Physiology**. New York: John Wiley & Sons, 2000.

INDEX MUNDI. **Preços de Mercado**. Disponível em: <https://www.indexmundi.com/pt/pre%C3%A7os-de-mercado/?mercadoria=fosfato-diamonico&moeda=brl>. Acesso em: 14/11/2019

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ — IAPAR. **Informações técnicas para a cultura do trigo no Paraná**. Londrina: IAPAR, 2000.

KANDELER, E.; GERBER, H. Short-term assay of soil urease activity using colorimetric determination of ammonium. **Biology and Fertility of Soils**, New York, v. 6, p. 68–72, 1988.

LAM, H. M.; COSCHIGANO, K. T.; OLIVEIRA, I. C.; MELO-OLIVEIRA, R.; CORUZZI, G. M. The molecular-genetics of nitrogen assimilation into amino acids in higher plants.

Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, Palo Alto, v. 47, p. 569–593, 1996.

LANA, R. M. Q.; PEREIRA, V. J.; LEITE, C. N.; TEIXEIRA, G. M.; GOMES, J. S.; CAMARGO, R. NBPT (urease inhibitor) in the dynamics of ammonia volatilization. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 13, n. 2, e5538, 2018.

LANNA, A. C.; SILVEIRA, P. M.; SILVA, M. B.; FERRAREZI, T. M.; KLIEMANN, H. J. Atividade de urease no solo com feijoeiro influenciada pela cobertura vegetal e sistemas de plantio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1933-1939, 2010.

LARA CABEZAS, W.A.R.; KORNDORFER, G.H.; MOTTA, S.A. Volatilização de N-NH₃ na cultura de milho: II. Avaliação de fontes sólidas e fluidas em sistema de plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 489–496, 1997.

LIBARDI, V. C. M.; COSTA, M. B. Consumo d'água da cultura do trigo (*Triticum aestivum*, L.). **Revista da Faculdade de Zootecnia, Veterinária e Agronomia**, Uruguaiana, v. 4, n. 1, p. 16–23, 1997.

LIMA, P. C. R. **Fábrica de fertilizantes nitrogenados e produção de etanol no norte fluminense**. Brasília: Centro de Documentação e Informação — Câmara dos Deputados, 2007.

LONGO, R. M.; MELO, W. J. Atividade da urease em latossolos sob influência da cobertura vegetal e da época de amostragem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 645–650, 2005.

LOPES, A. S.; BASTOS, A. R. R.; DAHER, E. Uso eficiente de fertilizantes nitrogenados e sulfatados na agricultura brasileira: uma visão do futuro. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S.; VITTI, G. C. **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2007. p. 161–188.

LOPES, Alfredo Scheid. **Manual internacional de fertilidade do solo**. Piracicaba: Potafós, 1998. p 177.

MALAVOLTA, E.; MORAES, M. F. Fundamentos do nitrogênio e do enxofre na nutrição mineral das plantas cultivadas. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. VITTI, G. C. **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2007. p. 189–250.

MANFRON, P. A.; LAZZAROTTO, C.; MEDEIROS, S. L. P. Trigo - Aspectos Agrometeorológicos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 23, n. 2, p. 233–239, 1993.

MANOSSO, F. C. A produtividade de soja, trigo e milho e suas relações com a precipitação pluviométrica no município de Apucarana-PR no período de 1968 a 2002. **Geografia**, Londrina, v. 14, n. 1, p. 87–98, 2005.

MARSCHNER P. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. Amsterdam: Elsevier/Academic Press, 2012.

MARTINEZ, H. E. P.; NOVAIS, R. R.; RODRIGUES, L. A.; SACRAMENTO, L. V. S. Comportamento de variedades de soja cultivadas em diferentes doses de fósforo: I. Cinética de absorção de fósforo e ajustes morfológicos da planta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 17, p. 231–238, 1993.

MIRA, A. B.; CANTARELLA, H.; SOUZA-NETTO, G. J. M.; MOREIRA, L. A.; KAMOGAWA, M. Y.; OTTO, R. Optimizing urease inhibitor usage to reduce ammonia emission following urea application over crop residues. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 248, p. 105–112, 2017.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e Bioquímica do Solo**. 2. ed. Lavras: UFLA, 2006.

OLIVEIRA, J. A.; STAFANATO, J. B.; GOULART, R. S.; ZONTA, E.; LIMA, E.; MAZUR, N.; PEREIRA, C. G.; SOUZA, H. N.; COSTA, F. G. M. Volatilização de amônia proveniente de ureia compactada com enxofre e bentonita, em ambiente controlado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 1558–1564, 2014.

OLIVEIRA, M. W.; TRIVELIN, P. C. O.; BOARETTO, A. E.; MURAOKA, T.; MORTATTI, J. Leaching of nitrogen, potassium, calcium and magnesium, in a sandy soil cultivated with sugarcane. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 6, p. 861–868, 2002.

OLIVEIRA NETO, A. A.; SANTOS, C. M. R. **A cultura do trigo**. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), 2017. 218 p.

OTTO, R.; ZAVASCHI, E.; SOUZA NETTO, G. J. M.; MACHADO, B. A.; MIRA, A. B. Ammonia volatilization from nitrogen fertilizers applied to sugarcane straw. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 48, n. 3, p. 413–418, 2017.

PANISSON, E.; REIS, E. M.; BOLLER, W. Efeito da época, do número de aplicações e de doses de fungicida no controle da giberela em trigo. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, v. 27, n. 5, p. 495–499, 2002.

RAWLUK, C. D. L.; GRANT, C. A.; RACKS, G. J. Ammonia volatilization from soils fertilized with urea and varying rates of urease inhibitor NBPT. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 81, p. 239–246, 2001.

REETZ, H. F. **Fertilizantes e o seu uso eficiente**. Tradução: Alfredo Scheid Lopes. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA), 2017. 178 p.

REIS, V. M.; TEIXEIRA, K. R. S. Fixação biológica do nitrogênio – estado de arte. In: AQUINO, A.M.; ASSIS, R.L. **Processos biológicos no sistema solo-planta: ferramentas**

para uma agricultura sustentável. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2005. p. 151–180.

RIBEIRO, E. E. A. **Eficiência da ureia com inibidor de urease no cultivo irrigado da forrageira *Tithonia diversifolia***. 2018. 48 f. Dissertação (Mestrado em Produção Animal)–Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, 2018.

ROCHA, J. R. A. S. C.; PIMENTEL, A. J. B.; RIBEIRO, G.; SOUZA, M.A. Eficiência de fungicidas no controle da brusone em trigo. **Summa Phytopathologica**, Botucatu, v. 40, n. 4, p. 347–352, 2014.

RODRIGUES, L. F. O. S.; GUIMARÃES, V. F.; SILVA, M. B.; PINTO JUNIOR, A. S.; KLEIN, J.; COSTA, A. C. P. R. Características agronômicas do trigo em função de *Azospirillum brasilense*, ácidos húmicos e nitrogênio em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 1, p. 31–37, 2014.

RODRIGUES, O.; DIDONET, A. D.; GOUVEIA, J. A.; SOARES, R. C. Nitrogen translocation in wheat inoculated with *Azospirillum* and fertilized with nitrogen. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 7, p. 1473–1481, 2000.

ROESCH, L. F.; CAMARGO, F. O.; SELBACH, P. A.; SÁ, E. S. Reinoculação de bactérias diazotróficas aumentando o crescimento de plantas de trigo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 5, p. 1201–1204, 2005.

SALA, V. M. R.; CARDOSO, E. J. B. N.; FREITAS, J. G.; SILVEIRA, A. P. D. Novas bactérias diazotróficas endofíticas na cultura do trigo em interação com a adubação nitrogenada, no campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1099–1106, 2008.

SALA, V. M. R.; CARDOSO, E. J. B. N.; FREITAS, J. G.; SILVEIRA, A. P. D. Resposta de genótipos de trigo à inoculação de bactérias diazotróficas em condições de campo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 6, p. 833–842, 2007.

SALA, V. M. R.; FREITAS, S. S.; DONZELI, V. P.; FREITAS, J. G.; GALLO, P. B.; SILVEIRA, A. P. D. Ocorrência e efeito de bactérias diazotróficas em genótipos de trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 345–352, 2005.

SANGOI, L.; ERNANI, P. R.; LECH, V. A.; RAMPAZZO, C. Volatilização de N-NH₃ em decorrência da forma de aplicação de ureia, manejo de resíduos e tipo de solo, em laboratório. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 4, p. 687–692, 2003.

SCHEEREN, P. L.; CASTRO, R. L.; CAIERÃO, E. Botânica, morfologia e descrição fenotípica. In: BORÉM, A.; SCHEEREN, P. L. **Trigo: do plantio à colheita**. Viçosa: Editora UFV, 2015. p. 35–55.

SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA E DO ABASTECIMENTO DO PARANÁ — SEAB. **Custos de Produção**. Curitiba: SEAB, 2020. Disponível em: <http://www.agricultura.pr.gov.br/CustosProducao>. Acesso em: 10/05/2020.

SIDDIQI, M. Y.; GLASS, A. D. M. Utilization index: A modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, London, v. 4, n. 3, p. 289–302, 1981.

SILVA, A. G. B.; SEQUEIRA, C. H.; SERMARINI, R. A.; OTTO, R. Urease inhibitor NBPT on ammonia volatilization and crop productivity: A meta-analysis. **Agronomy Journal**, Madison, v. 109, p. 1–13, 2017.

SILVA, D. F.; PEGORARO, R. F.; MAIA, V. M.; KONDO, M. K.; SOUZA, G. L. O. D.; MOTA, M. F. C. Volatilização de amônia do solo após doses de ureia com inibidores de urease e de nitrificação na cultura do abacaxi. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 64, n. 3, p. 327–335, 2017.

SILVA, S. R.; PIRES, J. L. F. Resposta do trigo BRS Guamirim à aplicação de *Azospirillum*, nitrogênio e substâncias promotoras do crescimento. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 48, p. 631–638, 2017.

SOARES, J. R. **Efeito de inibidores de urease e de nitrificação na volatilização de NH₃ pela aplicação superficial de ureia no solo**. 2011. 90 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical)—Instituto Agronômico, Campinas, 2011.

SWIADER, J. M.; CHYAN, Y.; FREIJI, F. G. Genotypic differences in nitrate uptake and utilization efficiency in pumpkin hybrids. **Journal of Plant Nutrition**, London, v. 7, n. 10, p. 1687–1699, 1994.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858 p.

TASCA, F. A.; ERNANI, P. R.; ROGERI, D. A.; GATIBONI, L. C.; CASSOL, P. C. Volatilização de amônia no solo após aplicação de ureia convencional ou com inibidor de urease. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 493–502, 2011.

TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; BUZETTI, S.; ANDREOTTI, M.; ARF, O.; BENETT, C. G. S. Doses, fontes e épocas de aplicação de nitrogênio em trigo irrigado em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 8, p. 797–804, 2010a.

TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; TARSITANO, M. A. A.; BUZETTI, S.; BERTOLIN, D. C.; COLOMBO, A. S.; NASCIMENTO, V. Análise econômica da adubação nitrogenada em trigo irrigado sob plantio direto no cerrado. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 57, n. 4, p. 446–453, 2010b.

TRANI, P. E.; TRANI, A. L. **Fertilizantes - cálculo de fórmulas comerciais**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 2011. (Boletim Técnico IAC, 208).

TRENKEL, M. E. **Slow - and controlled - release and stabilized fertilizers: An option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture**. 2. ed. Paris: International Fertilizer Industry Association (IFA), 2010.

VICTORIA, R. L.; PICCOLO, M. C.; VARGAS, A. A. T. O ciclo do nitrogênio. In: CARDOSO, E. J. B. N.; TSAI, S. M.; NEVES, M. C. P. **Microbiologia do Solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1992. p. 105–120.

VIEIRA, R. F. **Ciclo do nitrogênio em sistemas agrícolas**. 1. ed. Brasília: EMBRAPA, 2017. 163 p.

WATSON, C. J.; AKHONZADA, N. A.; HAMILTON, J. T. G.; MATTHEWS, D. I. Rate and mode of application of the urease inhibitor N-(n-butyl) thiophosphorictriamide on ammonia volatilization from surface-applied urea. **Soil Use and Management**, Belfast, v. 24, p. 246–253, 2008.

WENDLING, A.; ELTZ, F. L. F.; CUBILLA, M. M.; AMADO, T. J. C.; MIELNICZUCK, J.; LOVATO, T. Recomendação de adubação nitrogenada para trigo em sucessão ao milho e soja sob sistema de plantio direto no Paraguai. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 985–994, 2007.

WIETHÖLTER, S. Fertilidade do solo e a cultura do trigo no Brasil. In: PIRES, J. L. F.; VARGAS, L.; CUNHA, G. R. **Trigo no Brasil: bases para produção competitiva e sustentável**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2011. p. 135–185.

3. CAPÍTULO A – EFICIÊNCIA DE UTILIZAÇÃO DE NITROGÊNIO E RENDIMENTO DE GRÃOS DE TRIGO AFETADOS PELO MANEJO DA ADUBAÇÃO E PELAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS

RESUMO

O nitrogênio (N) é o principal nutriente da cultura do trigo, porém o manejo da adubação precisa ser melhorado por meio da inclusão de características ambientais, devido à complexa dinâmica do N no solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência de uso de N e o rendimento de grãos da lavoura de trigo em resposta a diferentes fontes e doses de N, e épocas da adubação nitrogenada em três condições ambientais. O experimento foi realizado em campo em dois locais no estado Paraná. Em Londrina foram utilizadas condições de sequeiro (L_{seq}) e de irrigação (L_{irrig}), enquanto em Ponta Grossa o trigo foi cultivado apenas em sequeiro (PG_{seq}). Os ensaios de campo foram conduzidos em delineamento em blocos casualizados em arranjo fatorial $(2 \times 2 \times 2) + 1$, composto por duas doses de N (40 e 80 kg ha⁻¹), duas fontes de N (nitrato de amônio e ureia) e duas épocas de adubação nitrogenada (durante a semeadura da lavoura ou no início do perfilhamento das plantas), além de um tratamento adicional sem adição de N (testemunha). Características agrônômicas avaliadas: rendimento de grãos, peso hectolítrico, peso de mil grãos, altura e acamamento de plantas, índice de colheita, densidade de plantas férteis, matéria seca da parte aérea (MSPA), teor e conteúdo de N na MSPA, e eficiência de utilização de N para rendimento de grãos (EUN_{RG}) e para produção de MSPA (EUN_{MSPA}). A adubação nitrogenada reduziu o índice de colheita em L_{seq} e a EUN_{RG} em ambas condições hídricas de Londrina; no entanto, ela aumentou a EUN_{MSPA} em todas condições ambientais. Ureia e nitrato de amônio apresentaram eficiência equivalente quanto ao rendimento de grãos de trigo, independente da dose ou época de adubação. Em L_{irrig} e L_{seq} a dose e a época de aplicação de N não influenciaram o rendimento de grãos. Porém, em condição de clima mais frio (PG_{seq}), a utilização de maior dose de N na semeadura proporcionou maior rendimento de grãos, peso de mil grãos e densidade de plantas férteis. Portanto, a dose de N pode ser reduzida em condições ambientais que favorecem a mineralização da matéria orgânica do solo e a decomposição da palhada de soja. A opção por ureia ou nitrato de amônio pode ser baseada em critérios econômicos em ambientes com baixo déficit hídrico e baixo potencial de volatilização de NH_3 . A fertilização com N realizada exclusivamente na semeadura pode ser adequada para suprir as necessidades de N da cultura.

Palavras-chave: *Triticum aestivum*; Nitrato de amônio; Ureia; Rendimento de grãos de trigo.

ABSTRACT: Nitrogen utilization efficiency and grain yield of wheat crop affected by nitrogen fertilization management and environmental conditions

Nitrogen (N) is the main nutrient in wheat crop, however, fertilization management needs to be improved through the inclusion of environmental characteristics, due to the complex N dynamic in the soil. The objective of this work was to evaluate the N utilization efficiency and grain yield of wheat crop in response to different sources and rates of N, and timings of N fertilization in three environmental conditions. The experiment was carried out in a field situation in two sites in the State of Paraná. In Londrina, rainfed ($L_{rainfed}$) and irrigation (L_{irrig}) conditions were used, while in Ponta Grossa wheat was grown only in rainfed ($PG_{rainfed}$). The trials were carried out in a randomized block design in a factorial arrangement $(2 \times 2 \times 2) + 1$, with two rates of N (40 and 80 kg ha⁻¹), two sources of N (ammonium nitrate and urea), two timings for N fertilization (during crop sowing or at the beginning of plant tillering), and an additional treatment with no N fertilization (control). Agronomic characteristics evaluated: grain yield, hectolitic weight, thousand grain weight, plant height and lodging, harvest index, density of fertile plants, shoot dry matter (SDM), N concentration and content in the SDM, and N utilization efficiency for grain yield (NUE_{GY}) and for SDM production (NUE_{SDM}). Nitrogen fertilization reduced harvest index in $L_{rainfed}$ and NUE_{GY} in both water conditions in Londrina; however, it increased NUE_{SDM} in all environmental conditions. Urea and ammonium nitrate showed equivalent efficiency in terms of wheat grain yield, regardless of rate or timing of fertilization. In L_{irrig} and $L_{rainfed}$ the rate and the timing of N application did not influence grain yield. However, in a colder climate (PG_{seq}), the use of a higher N rate at sowing provided greater grain yield, thousand grain weight, and density of fertile plants. Therefore, the N rate can be reduced in environmental conditions that favor the mineralization of soil organic matter and the decomposition of soybean straw. The option for urea or ammonium nitrate can be based on economic criteria in environments with low water deficit and low potential for NH₃ volatilization. Nitrogen fertilization carried out exclusively at sowing may be suitable to supply N crop requirements.

Keywords: *Triticum aestivum* (L); Ammonium nitrate; Urea; Wheat grain yield.

3.1. INTRODUÇÃO

O trigo (*Triticum aestivum* L.) é amplamente cultivado para fins alimentícios, sendo empregado principalmente nas formas de farinha e farelo para alimentação humana e animal, respectivamente (SCHEEREN et al., 2015). Mais de dois milhões de hectares são cultivados com trigo no Brasil, principalmente nos estados do Paraná e Rio Grande do Sul que contribuem com 85% da produção nacional (CONAB, 2020a). No entanto, o país não tem sido autossuficiente na produção de trigo, que o leva a importar mais da metade de sua demanda para suprir seu consumo interno (CONAB, 2020b). Aumentos da produtividade de grãos por meio do manejo da cultura podem melhorar a competitividade da safra brasileira de trigo e diminuir sua dependência do fornecimento externo.

A melhor gestão de fertilizantes tem sido associada com melhorias na produtividade da cultura em escalas de tempo históricas (SINCLAIR e RUFTY, 2012). Dentre os nutrientes minerais essenciais para o desenvolvimento vegetal, o nitrogênio (N) destaca-se por estar presente em diversas estruturas da planta, como parede celular, proteínas, ácidos nucleicos, enzimas e coenzimas, além de atuar no processo de fotossíntese, devido à sua presença na molécula de clorofila (TAIZ et al., 2017).

O N absorvido pelas raízes é transportado através do xilema, via corrente respiratória, principalmente nas formas de nitrato (NO_3^-), amônio (NH_4^+) e aminoácidos (MALAVOLTA e MORAES, 2007). O N é translocado via floema das folhas para outras partes da planta, como grãos e raízes, nas formas de NO_3^- , NH_4^+ , aminoácidos ou produtos da sua assimilação (EPSTEIN e BLOOM, 2005).

A eficiência de utilização (EU) de um nutriente pelas plantas é geralmente calculada como o quociente da massa seca produzida pela planta e o conteúdo do nutriente acumulado na biomassa vegetal (SWIADER et al., 1994). Siddiqi e Glass (1981) propuseram um índice específico de EU em função da concentração do nutriente na massa seca. Eles relatam que o crescimento da planta está também relacionado à concentração do nutriente nos tecidos e não somente à quantidade absoluta acumulada, pois o crescimento só ocorre a partir de uma concentração mínima do nutriente no tecido vegetal. Segundo Baligar et al. (2001), como este índice leva em conta tanto parâmetros biométricos como fisiológicos, ele é uma ferramenta eficaz para a avaliação do estado nutricional das plantas.

A complexa dinâmica do N no solo e a sua interação com o clima e os resíduos de culturas anteriores desafiam o manejo da adubação nitrogenada (REETZ, 2017; TEI et al., 2020). Por exemplo, em locais onde o trigo é semeado sob palhada de milho, é recomendado a

antecipação total ou parcial do N que seria fornecido na adubação em cobertura, a fim de reduzir os efeitos negativos da imobilização de N pela atividade microbiana (WIETHÖLTER et al., 2011; MARZI et al., 2020). No entanto, elevadas doses de N na semeadura podem contribuir para um decréscimo no rendimento de grãos do trigo em função da falta de sincronia entre os períodos de oferta e maior demanda do nutriente pela cultura (CHEN et al., 2017; CLUNES e PINOCHET, 2020), diminuindo a eficiência de uso do N (LOLLATO et al., 2021). Por outro lado, plantas de trigo que recebem N em cobertura, principalmente em doses elevadas, estão mais sujeitas ao acamamento (KHAN et al., 2019). Entretanto, o grau de acamamento varia de acordo com a cultivar, dose de N e ambiente edafoclimático (ESPINDULA et al., 2010; FOLONI et al., 2014).

As fontes minerais de fertilizantes nitrogenados apresentam distintas eficiências agronômicas, que são influenciadas pelas condições ambientais (pH do solo, umidade, temperatura, etc.) e pelo potencial de volatilização de amônia (NH_3) no caso da ureia (WIETHÖLTER et al., 2011). As principais fontes de N utilizadas na triticultura são o nitrato de amônio (NH_4NO_3) e a ureia [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$].

O nitrato de amônio contém de 33 a 34% de N, sendo metade na forma amoniacal e a outra metade na forma nítrica, ambas prontamente disponíveis às plantas. Ele é produzido a partir da reação do gás NH_3 com ácido nítrico e, posteriormente, solidificado em forma de grânulos. O nitrato de amônio é adequado para fertirrigação e aplicação foliar, devido à sua elevada solubilidade (REETZ, 2017), sendo uma fonte segura para ser utilizada no momento da semeadura (FOLONI et al., 2014). Entretanto, ele apresentava custo unitário (por unidade de N) cerca de 42% superior à ureia em 2020 (CONAB, 2020c).

A ureia se destaca como fonte de N devido à sua produção a partir de NH_3 e dióxido de carbono (CO_2), o que a torna menos onerosa do que os demais fertilizantes nitrogenados. Além disso, ela possui alta concentração de N (45%), o que reduz seu custo com transporte e armazenamento. No entanto, a adubação com ureia pode resultar em maiores perdas de N devido à reação deste fertilizante com a enzima urease, naturalmente presente no solo, que catalisa a hidrólise da ureia, sendo que o NH_4^+ formado é passível de ser convertido em NH_3 , que é perdido por volatilização (TASCA et al., 2011). Além disso, a ureia apresenta restrições quanto à sua utilização simultânea com a semeadura dos grãos, devido à sua salinidade, sendo que o contato direto das sementes com o fertilizante pode causar falhas no estande de plantas da lavoura (WIETHÖLTER et al., 2011; FOLONI et al., 2014; GARCIA et al., 2019).

Vários estudos avaliaram a eficiência de fontes de adubos nitrogenados para diversas culturas agrícolas gramíneas, como milho (VIERO et al., 2014; KAUR et al., 2017), trigo

(VIERO et al., 2014; GALINDO et al., 2019; KANEKO et al., 2020), arroz (LIU et al., 2018; AMANULLAH et al., 2020) e cana de açúcar (BOSCHIERO et al., 2018; DEGASPARI et al., 2019). Porém, os resultados obtidos variam muito e raramente consideram a influência de variáveis ambientais e/ou meteorológicas durante a safra agrícola. Nós hipotetizamos que as condições ambientais são determinantes da liberação de N das fontes dos fertilizantes para as plantas, influenciando fortemente sua EUN e, consequentemente, a produtividade do trigo. Deste modo, o manejo da adubação nitrogenada pode ser melhorado por meio da inclusão de modelos de previsão meteorológica (principalmente disponibilidade de água e temperatura) durante o ciclo da cultura para ajustar as técnicas de adubação. Deste modo, o objetivo deste trabalho foi avaliar a EUN e o rendimento de grãos da lavoura de trigo em resposta a diferentes fontes, doses e épocas da adubação com N, considerando a influência de três condições ambientais.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1. Caracterização dos locais e das condições ambientais

O experimento foi realizado na safra de 2016 em duas localidades no estado Paraná: Londrina (23°11'37" S, 51°11'03" W; altitude de 628 m) e Ponta Grossa (25°08'59" S, 50°04'39" W; altitude de 876 m). Em Londrina, foram utilizadas condições de sequeiro (L_{seq}) e de irrigação (L_{irrig}), enquanto em Ponta Grossa o trigo foi cultivado apenas em sequeiro (PG_{seq}). Portanto, consideramos um total de três ambientes. Os ensaios L_{irrig} e L_{seq} foram dispostos lado a lado, separados por uma distância de 10 m.

Em Londrina o relevo é suavemente ondulado e o solo da área experimental possui textura argilosa (732 g kg⁻¹ de argila), sendo classificado, de acordo com o USDA Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 2014), como Rhodic Eutrudox (Latossolo Vermelho eutroférico, no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos; SANTOS et al., 2013). O solo apresentava as seguintes características químicas na camada superficial (0–20 cm): pH em CaCl₂ (0,01 mol L⁻¹) de 5,4; 4,59 cmol_c dm⁻³ de acidez potencial (H+Al); 15,5 g dm⁻³ de carbono orgânico total; 37,1 mg dm⁻³ de P disponível (Mehlich-1); 207 mg dm⁻³ de K trocável; 4,30 cmol_c dm⁻³ de Ca²⁺ trocável; 2,24 cmol_c dm⁻³ de Mg²⁺ trocável; saturação por bases (V) de 60,5%; 0,01 cmol_c dm⁻³ de Al³⁺ trocável; e capacidade de troca catiônica (CTC) de 11,65 cmol_c dm⁻³. O clima regional, de acordo com a classificação de Köppen, é subtropical úmido (Cfa), com verão quente e chuvoso, com temperatura e precipitação médias

anuais de 21,2 °C e 1438 mm, respectivamente; geadas pouco frequentes e sem estação seca definida (SIBALDELLI e FARIAS, 2019).

Em Ponta Grossa o relevo é suavemente ondulado e o solo da área experimental possui textura média (526 g kg⁻¹ de argila), sendo classificado como Rhodic Hapludox (SOIL SURVEY STAFF, 2014) ou Latossolo Vermelho distroférico (SANTOS et al., 2013), apresentando as seguintes características químicas na camada superficial (0–20 cm): pH em CaCl₂ (0,01 mol L⁻¹) de 4,7; 5,65 cmol_c dm⁻³ de acidez potencial (H+Al); 23,4 g dm⁻³ de carbono orgânico total; 7,9 mg dm⁻³ de P disponível (Mehlich-1); 127 mg dm⁻³ de K trocável; 2,94 cmol_c dm⁻³ de Ca²⁺ trocável; 1,06 cmol_c dm⁻³ de Mg²⁺ trocável; saturação por bases (V) de 43,5%; 0,11 cmol_c dm⁻³ de Al³⁺ trocável; e capacidade de troca catiônica (CTC) de 9,97 cmol_c dm⁻³. O clima regional é subtropical úmido (Cfb) mesotérmico, com temperatura média anual de 17,5 °C e precipitação média anual de 1500 mm, com chuvas bem distribuídas e geadas frequentes (NITSCHKE et al., 2019).

As condições meteorológicas, durante a estação de crescimento do trigo nos dois ambientes, foram registradas em estações meteorológicas localizadas a 500 e 800 m distância dos experimentos, em Londrina e Ponta Grossa. Com essas informações foi calculado o balanço hídrico decendial pelo método de Thornthwaite e Mather (1955). Estas informações também foram utilizadas no ambiente irrigado de Londrina para indicar os momentos de suplementação hídrica por meio de um sistema de irrigação autopropelido por aspersão.

Previamente à semeadura do trigo, foi realizada uma estimativa da quantidade de palhada de soja nas áreas experimentais, por meio da amostragem de quatro sub-áreas de 0,5 × 0,5 m (0,25 m²), definidas ao acaso por meio do lançamento de um gabarito. As amostras de palhada foram colocadas em estufa com circulação forçada de ar a 65 °C por 72 horas para secagem. Após pesagem da matéria seca e sua divisão pela área amostrada, obteve-se 4.550 e 5.870 kg ha⁻¹ de matéria seca de palhada de soja presente nas áreas experimentais de Londrina e Ponta Grossa, respectivamente.

3.2.2. Delineamento experimental e descrição dos tratamentos

Os ensaios de campo foram conduzidos em delineamento em blocos casualizados, com três repetições, em arranjo fatorial (2 × 2 × 2) + 1, composto por duas doses de N (40 e 80 kg ha⁻¹), duas fontes de N (nitrato de amônio e ureia) e duas épocas de adubação nitrogenada (durante a semeadura da lavoura ou no início do perfilhamento das plantas), além de um

tratamento adicional sem adição de N (testemunha). As doses de N foram baseadas nas indicações técnicas para a cultura de trigo no Paraná (FOLONI et al., 2016).

A parcela experimental foi composta por nove linhas de semeadura com 6 m de comprimento, espaçadas 0,178 m entre si, totalizando 9,6 m². Para avaliação dos tratamentos foi desprezada uma linha de cada lateral, considerando como área útil da parcela as sete linhas centrais de semeadura com um total de 7,5 m². O trigo foi semeado sobre palhada de soja, em sistema plantio direto, a 4 cm de profundidade, com densidade de semeadura de 350 sementes viáveis por metro quadrado. Os tratamentos específicos com adubação nitrogenada no dia da semeadura foram aplicados no sulco anteriormente à semeadura, utilizando o mesmo implemento que foi utilizado para semear o trigo. A adubação de base também foi realizada no sulco, no momento da semeadura do trigo, com dose de 300 kg ha⁻¹ do formulado 00-20-20 (N-P₂O₅-K₂O), para o adequado fornecimento de fósforo e potássio às plantas, de acordo com premissas da Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale (CBPTT, 2016). Os tratamentos com adubação nitrogenada em cobertura foram aplicados no início do perfilhamento da cultura (estádio fenológico GS21 da escala de Zadoks et al., 1974). O manejo fitossanitário e demais tratos culturais foram baseados nas indicações da CBPTT (2016).

A cultivar de trigo BRS Gralha-Azul foi semeada nos ensaios de campo, pois ela é amplamente cultivada nos estados do Paraná e Santa Catarina, apresentando alta produtividade, mas sendo suscetível ao acamamento de plantas, principalmente quando se utilizam altas doses de N em condições de alta disponibilidade hídrica. Ela apresenta ciclo de desenvolvimento (emergência de plântulas até maturidade fisiológica de sementes) médio de 110 dias e altura média de 90 cm (BASSOI e FOLONI, 2015).

3.2.3. Avaliações agronômicas e índices de eficiência de utilização de nitrogênio

No estágio fenológico de pleno florescimento (GS69 da escala de Zadoks), plantas de trigo (exceto raízes) foram colhidas em duas linhas de lavoura com 0,5 m de extensão (0,18 m²) na parte central da parcela experimental. A seguir a biomassa verde foi acondicionada em saco de papel e colocada em estufa com circulação forçada de ar a 65 °C por 72 horas para secagem, para posterior pesagem em balança de precisão e cálculo do valor de matéria seca da parte aérea (MSPA, kg ha⁻¹). As amostras de tecido vegetal foram moídas em moinho tipo Wiley de aço inoxidável, passadas em peneira de 0,1 mm, para subsequente determinação de N pelo método de Kjeldahl. Para avaliação do N absorvido pelas plantas, o conteúdo de N

acumulado na MSPA das plantas foi estimado a partir da quantidade de MSPA e do teor de N neste tecido vegetal [N acumulado na MSPA (kg ha^{-1}) = MSPA (kg ha^{-1}) \times teor (g kg^{-1}) / 1000]. O florescimento pleno foi escolhido para esta avaliação devido ser o estágio fenológico com maior conteúdo de N absorvido pela biomassa vegetativa da planta (Wiethölter, 2011), apresentando, portanto, maior contribuição para a formação e rendimento de grãos.

A eficiência de utilização de N (EUN) da lavoura de trigo para produção de MSPA no estágio de crescimento GS69 foi estimada por meio do cálculo proposto por Siddiqi e Glass (1981), tendo como base a área de um hectare (considerando MSPA em kg ha^{-1} , e o N acumulado na MSPA em g ha^{-1}), de acordo com a seguinte equação (1):

$$EUN \text{ para MSPA } (\text{kg}^2 \text{ g}^{-1} \text{ ha}^{-1}) = \frac{(MSPA)^2}{N \text{ acumulado na MSPA}} \quad (1)$$

Para determinar o rendimento de grãos (RG; kg ha^{-1}) na maturidade fisiológica, foi realizada a colheita (sete linhas centrais \times 6 m de comprimento) com colhedora automotriz desenvolvida para experimentação agrônômica (Wintersteiger®), registrando-se a massa de grãos após ajuste da umidade para 13%. Nesses grãos colhidos também foram avaliados o peso hectolítrico e o peso de mil de grãos.

O índice de colheita aparente (ICA), adaptado de Donald e Hamblin (1976), porém, considerando a MSPA no GS69 (devido à sua alta correção com o rendimento de grãos de trigo, como reportado por Chen et al., 2019), foi calculado por meio da Equação 2, utilizando como base a área de um hectare (RG e MSPA em kg ha^{-1}):

$$ICA (\text{kg kg}^{-1}) = \frac{RG}{(RG + MSPA)} \quad (2)$$

Por sua vez, a EUN da lavoura de trigo para RG foi estimada considerando o N acumulado na MSPA (em kg ha^{-1}) no estágio de crescimento GS69 e o RG (em kg ha^{-1}) na maturidade fisiológica (Equação 3):

$$EUN \text{ para RG } (\text{kg kg}^{-1}) = \frac{RG}{N \text{ acumulado na MSPA}} \quad (3)$$

Também foram avaliados no estágio GS69 a altura (média de cinco plantas por parcela) e a densidade de plantas férteis (determinada através da contagem do número total de espigas em duas linhas de plantas com 0,5 m de extensão, dividido pela respectiva área amostrada, expressando o resultado em espigas m^{-2}). Finalmente, no dia anterior à colheita de grãos foi avaliado o acamamento de plantas (método visual; EMBRAPA, 2009).

3.2.4. Análises estatísticas

As análises estatísticas foram realizadas por meio do software R (R CORE TEAM, 2020), utilizando o pacote ExpDes.pt (FERREIRA et al., 2011). Os dados foram submetidos ao teste de normalidade de resíduos de Shapiro-Wilk e ao teste de homogeneidade de variâncias de Bartlett. Atendidas as pressuposições, foi aplicada a análise de variância seguida pelo teste de Student-Newman-Keuls, ambos a 5% de significância.

3.3. RESULTADOS

3.3.1. Balanço hídrico durante os estádios fenológicos e adubação das plantas de trigo

O experimento de campo foi replicado em três condições ambientais na safra de 2016, que foram influenciadas por diferentes condições meteorológicas e/ou manejos de irrigação, proporcionando três balanços hídricos distintos (Figura 1). Durante a estação de crescimento do trigo (desde a semeadura até a colheita) em L_{seq} houve temperatura média de 17,6 °C e precipitação total acumulada de 465,3 mm (dados não apresentados), que são considerados adequados para o desenvolvimento da cultura. Porém, a distribuição da chuva foi irregular, gerando um déficit hídrico acumulado de 31,4 mm, concentrado nos estádios fenológicos de alongamento até o início da formação do grão (Figura 1a). Por outro lado, em L_{irrig} as irrigações (com total de 125 mm) realizadas nos períodos de estiagem reduziram o déficit hídrico para um acumulado de apenas 4,3 mm (Figura 1b). Finalmente, em PG_{seq} a temperatura média foi de 16,4 °C e houve bom volume (526,4 mm) e adequada distribuição das chuvas (dados não apresentados) durante a safra de trigo, resultando em um baixo déficit hídrico de 5,6 mm, distribuído ao longo do ciclo (Figura 3c). Estas condições ambientais proporcionam à cultura de trigo ciclos de 139 e 141 dias em Londrina e Ponta Grossa, respectivamente, que são semelhantes, a despeito das datas de semeadura terem sido espaçadas em dois meses (29 de abril em Londrina e 30 de junho em Ponta Grossa), em função das indicações do Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) para a cultura do trigo no estado do Paraná.

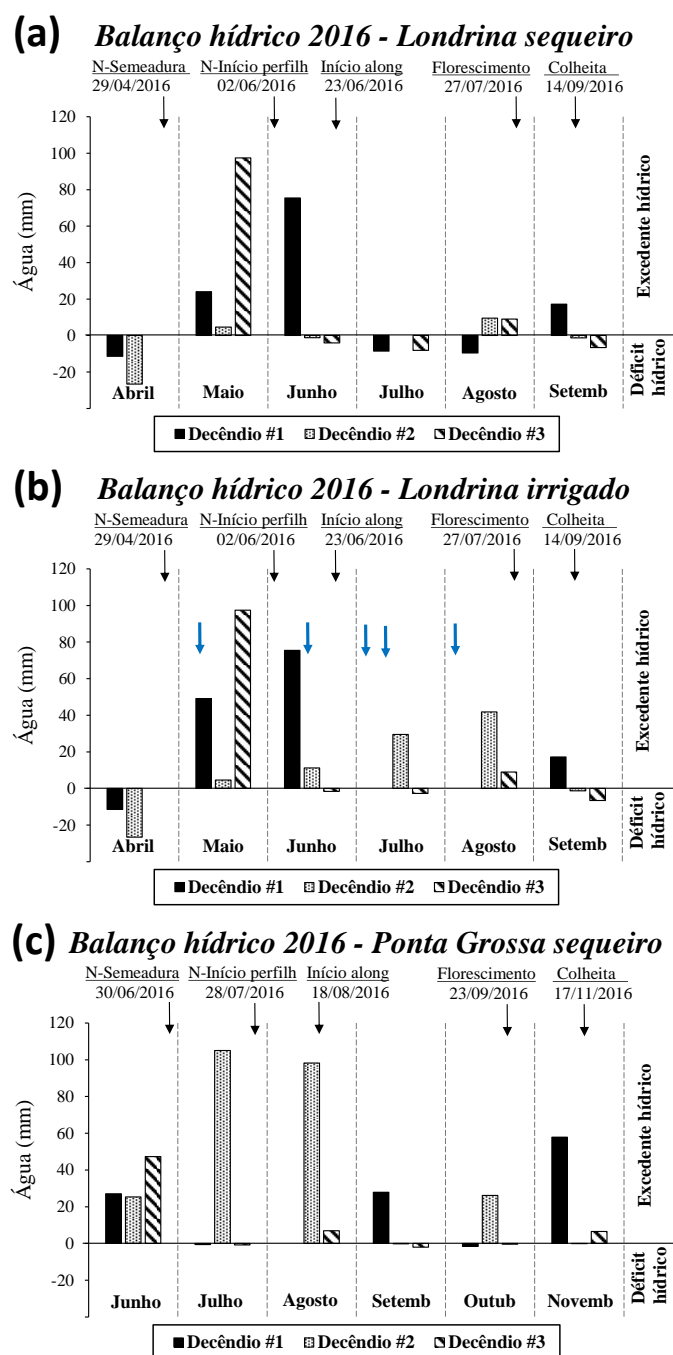


Figura 1. Balanço hídrico decendial na estação de crescimento do trigo na safra de 2016 em Londrina [29/04 a 14/09/2016 = 139 dias; condições de sequeiro (a) e irrigado (b)] e Ponta Grossa [30/06 a 17/11/2016 = 141 dias; condição de sequeiro (c)]. Setas na cor azul (b) indicam irrigações de 25 mm, realizadas em 04/05, 17/06, 01/07, 13/07 e 02/08/2016.

Desde a semeadura do trigo até o início do estágio de perfilhamento (GS21) as condições de umidade no solo foram favoráveis à germinação das sementes e ao bom estabelecimento inicial do estande de plantas nos três locais experimentais (Figuras 1a, 1b e

1c). Em seguida, houve alguns períodos de déficit hídrico em L_{seq} , distribuídos entre o terço final do perfilhamento (GS22) até o início da formação do grão (GS73), sendo a fase de alongamento dos colmos (GS30 a GS39) a mais prejudicada (Figura 1a). Por sua vez, o florescimento do trigo ocorreu em períodos com baixa oferta hídrica nos três ambientes (Figuras 1a, 1b e 1c), principalmente em L_{seq} , onde as chuvas foram restabelecidas somente duas semanas após a antese (dados não apresentados).

A adubação realizada no sulco de semeadura da lavoura foi realizada em solo com boa umidade; porém, ela foi seguida por 8, 5 e 12 dias sem fornecimento significativo de água (acumulado $<4,3$ mm) em L_{seq} , L_{irrig} e PG_{seq} , respectivamente (dados não apresentados).

Por sua vez, a adubação nitrogenada de cobertura no início do estágio de perfilhamento (GS21) foi realizada em boas condições de umidade no solo em Londrina, e com solo mais seco em Ponta Grossa (Figuras 1a, 1b e 1c). Além disso, em PG_{seq} houve apenas 2,2 mm de chuvas nos 10 dias subsequentes à adubação de cobertura (dados não apresentados). Por outro, em L_{seq} e L_{irrig} houve um total de 78,3 mm de chuvas nos quatro dias seguintes à adubação. Finalmente, esse volume pluviométrico foi seguido por um período de 39 dias de estiagem, durante o qual foram realizadas três irrigações (de 25 mm cada) em L_{irrig} (Figura 1b).

3.3.2. Características agrônômicas e rendimento de grãos da cultura de trigo

A densidade de plantas férteis (DPF) alcançou médias de 386, 455 e 535 espigas m^{-2} em L_{seq} , L_{irrig} e PG_{seq} , respectivamente; sendo 'média' = [(fatorial \times 8) + adicional]/9 (Tabela 1). A adubação nitrogenada, independente de doses, fontes ou épocas de aplicação, aumentou a DPF em média de 18,7% em L_{seq} , em comparação com o tratamento adicional sem adição de N (testemunha). Além disso, em PG_{seq} a aplicação de 80 $kg\ ha^{-1}$ de N aumentou em 14,4% a DPF, em relação ao uso de 40 $kg\ ha^{-1}$ de N.

Tabela 1. Significância da análise de variância (ANOVA) dos efeitos principais [dose de N (D), fonte de N (F), e época de adubação (E)] e de suas interações; e médias de densidade de plantas férteis (DPF), rendimento de grãos, peso hectolétrico e peso de mil grãos da cultivar de trigo BRS Gralha-Azul, cultivada em três ambientes [Londrina-sequeiro (L_{seq}), Londrina-irrigado (L_{irrig}) e Ponta Grossa-sequeiro (PG_{seq})], com duas doses e duas fontes de N, considerando duas épocas de adubação.

Fonte de variação	GL ⁽³⁾	DPF			Rendimento de grãos			Peso hectolétrico			Peso de mil grãos		
		L _{seq}	L _{irrig}	PG _{seq}	L _{seq}	L _{irrig}	PG _{seq}	L _{seq}	L _{irrig}	PG _{seq}	L _{seq}	L _{irrig}	PG _{seq}
Bloco	2	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns
Dose de N (D)	1	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Fonte de N (F)	1	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Época de adubação (E)	1	ns	ns	ns	ns	ns	***	ns	ns	ns	ns	*	**
D x F	1	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns
D x E	1	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns
F x E	1	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns
D x F x E	1	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Adicional vs Fatorial ⁽¹⁾	1	*	ns	ns	**	*	***	ns	ns	ns	ns	*	ns
CV (%) ⁽²⁾		10,1	11,1	12,5	11,0	10,7	5,0	4,0	1,2	6,0	3,3	3,4	2,8

Fator	Tratamento	DPF (espigas m ⁻²)			Rendimento de grãos (kg ha ⁻¹)			Peso hectolétrico (kg hL ⁻¹)			Peso de mil grãos (g)		
		L _{seq}	L _{irrig}	PG _{seq}	L _{seq}	L _{irrig}	PG _{seq}	L _{seq}	L _{irrig}	PG _{seq}	L _{seq}	L _{irrig}	PG _{seq}
Dose de N (D)	40 kg ha ⁻¹	408	467	508 b	3.084	4.289	5.986	79,3	79,2	78,1	35,8	31,9	36,3
	80 kg ha ⁻¹	379	435	581 a	3.292	4.448	6.107	78,1	79,1	78,1	35,8	32,2	35,7
Fonte de N (F)	NA ⁽⁴⁾	397	453	556	3.282	4.342	6.066	78,1	79,4	77,9	35,4	32,2	36,0
	Ureia	390	450	533	3.095	4.395	6.027	79,3	78,8	78,4	36,4	31,9	36,0
Época de adubação (E)	Semeadura	408	449	570	3.238	4.448	6.324	78,7	79,5	78,2	36,0	32,6	36,8 a
	Perfilhamento	379	454	519	3.138	4.289	5.769	78,7	78,7	78,0	35,8	31,5	35,3 b
Adicional vs Fatorial	Adicional	331 b	491	463	2.547 b	3.670 b	5.313 b	80,2	79,3	76,8	36,2	30,5 b	35,9
	Fatorial	393 a	451	544	3.188 a	4.368 a	6.047 a	78,7	79,1	78,1	35,9	32,0 a	36,0

⁽¹⁾Tratamento adicional = testemunha sem adubação nitrogrenada. ⁽²⁾CV = coeficiente de variação. ⁽³⁾GL = graus de liberdade (nota: GL Resíduo = 16). ⁽⁴⁾NA = nitrato de amônio. ns, *, ** e *** = não significativo, significativo a $P \leq 0,05$, $P \leq 0,01$ e $P \leq 0,001$, respectivamente, pelo teste F. Individualmente para os fatores D ou F ou E, médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste F.

O rendimento de grãos foi em média de 3.117, 4.291 e 5.965 kg ha⁻¹ em L_{seq}, L_{irrig} e PG_{seq}, respectivamente (Tabela 1). Ele foi aumentado pela adubação nitrogenada nas três condições ambientais, cujos acréscimos foram de 25,2% (641 kg ha⁻¹), 19% (698 kg ha⁻¹) e 13,8% (734 kg ha⁻¹) em relação à testemunha, em L_{seq}, L_{irrig} e PG_{seq}, respectivamente. Analisando somente o fatorial com tratamentos de N, verifica-se que não houve efeito de dose ou fonte ou época de aplicação de N sobre o rendimento de grãos em L_{seq} e L_{irrig} (Tabela 1). No entanto, em PG_{seq} houve interação entre época de adubação e dose de N, sendo que a adição de 80 kg ha⁻¹ de N na semeadura do trigo proporcionou incrementos de rendimento de grãos de 16 e 7,8% em relação à mesma adubação realizada no estádio de perfilhamento ou quando utilizou metade da dose (40 kg ha⁻¹ de N) na semeadura, respectivamente (Tabela 2).

Tabela 2. Desdobramento da análise de variância (ANOVA) para a interação dose de N *versus* época de adubação, para rendimento de grãos da cultivar de trigo BRS Gralha-Azul, cultivada em Ponta Grossa em condições de sequeiro (PG_{seq}) com duas doses de N e duas épocas de adubação.

Época de adubação	Rendimento de grãos-PG _{seq} (kg ha ⁻¹)	
	Dose de N	
	40 kg ha ⁻¹	80 kg ha ⁻¹
Semeadura	6.086 aB	6.562 aA
Perfilhamento	5.886 aA	5.653 bA

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Student-Newman-Keuls ($P \leq 0,05$).

O peso hectolítrico foi similar nos três ambientes, ou seja, ele apresentou médias de 78,9, 79,1 e 78 kg hL⁻¹ em L_{seq}, L_{irrig} e PG_{seq}, respectivamente, sendo que ele não foi influenciado pela adubação nitrogenada e nem pelos fatores estudados (dose, fonte e época de aplicação de N), ou seja, ele apresentou elevada estabilidade fenotípica (Tabela 1).

Por sua vez, o peso de mil grãos (PMG) aumentou em média 4,9% em L_{irrig} devido à adição de N, quando comparado à testemunha (Tabela 1). Em PG_{seq}, a adubação nitrogenada na semeadura aumentou o PMG em 4,2% em relação àquela realizada no perfilhamento das plantas. Com relação à fonte de N, a ureia aumentou em 5,7% o PMG em relação ao uso de

nitrito de amônio, considerando apenas a dose de 80 kg ha⁻¹ de N em L_{seq} (Tabela 3). Porém, em L_{irrig} houve redução de 4,5% do PMG devido ao uso de ureia no lugar do nitrito de amônio na adubação realizada na semeadura da lavoura. Além disso, o nitrito de amônio proporcionou maior PMG (aumento de 7,1%) quando utilizado na semeadura, em comparação à sua aplicação no estágio de perfilhamento das plantas (Tabela 3). Comparando os três ambientes, obteve-se médias de PMG de 35,9, 31,9 e 36 g em L_{seq}, L_{irrig} e PG_{seq}, respectivamente (Tabela 1).

Tabela 3. Desdobramento da análise de variância (ANOVA) para as interações fonte de N *versus* dose de N, e fonte de N *versus* época de adubação para peso de mil grãos (PMG) da cultivar de trigo BRS Gralha-Azul cultivada em Londrina em condições de sequeiro (L_{seq}) e irrigação (L_{irrig}), respectivamente.

Fonte de N	PMG- L _{seq} (g)		PMG- L _{irrig} (g)	
	Dose de N		Época de adubação	
	40 kg ha ⁻¹	80 kg ha ⁻¹	Semeadura	Perfilhamento
Nitrato de amônio	36,1 aA	34,8 bA	33,3 aA	31,1 aB
Ureia	35,9 aA	36,8 aA	31,8 bA	31,9 aA

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Student-Newman-Keuls ($P \leq 0,05$).

A altura de plantas foi em média 78,1, 87,2 e 88,1 cm em L_{seq}, L_{irrig} e PG_{seq}, respectivamente (Tabela 4). Em L_{seq} a adubação nitrogenada aumentou em média 7,5% a altura das plantas. Lavouras de trigo que receberam o N na semeadura apresentaram altura média 4,1% superior em relação àquelas adubadas no início do perfilhamento em L_{seq}. Por outro lado, nesse ambiente o aumento da dose de N de 40 para 80 kg ha⁻¹ proporcionou plantas 4,7% mais baixas.

Tabela 4. Significância da análise de variância (ANOVA) dos efeitos principais [dose de N (D), fonte de N (F), e época de adubação (E)] e de suas interações; e médias de altura, acamamento de plantas, matéria seca da parte aérea no estágio de florescimento e índice de colheita aparente (ICA) da cultivar de trigo BRS Gralha-Azul, cultivada em três ambientes [Londrina-sequeiro (L_{seq}), Londrina-irrigado (L_{irrig}) e Ponta Grossa-sequeiro (PG_{seq})], com duas doses e duas fontes de N, considerando duas épocas de adubação.

Fonte de variação	GL ⁽³⁾	Altura de planta			Acamamento de plantas			MSPA			ICA		
		L_{seq}	L_{irrig}	PG_{seq}	L_{seq}	L_{irrig}	PG_{seq}	L_{seq}	L_{irrig}	PG_{seq}	L_{seq}	L_{irrig}	PG_{seq}
Bloco	2	ns	ns	ns	ns	ns	-	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Dose de N (D)	1	*	ns	ns	ns	ns	-	ns	*	*	ns	ns	ns
Fonte de N (F)	1	ns	ns	ns	ns	*	-	ns	*	*	ns	ns	ns
Época de adubação (E)	1	*	ns	ns	ns	ns	-	*	ns	ns	ns	ns	ns
D x F	1	ns	ns	ns	ns	ns	-	ns	ns	ns	ns	ns	ns
D x E	1	ns	ns	ns	ns	ns	-	ns	ns	ns	ns	ns	*
F x E	1	ns	ns	ns	ns	ns	-	*	ns	ns	ns	ns	ns
D x F x E	1	ns	ns	ns	ns	ns	-	ns	ns	*	ns	ns	*
Adicional vs Fatorial ⁽¹⁾	1	*	ns	ns	ns	ns	-	***	***	*	***	ns	ns
CV (%) ⁽²⁾		4,4	2,8	4,6	3,3	2,4	-	12,7	8,2	9,7	10,4	8,4	6,5

Fator	Tratamento	Altura de planta (cm)			Acamamento de plantas (%)			MSPA (kg ha ⁻¹)			ICA (kg kg ⁻¹)		
		L_{seq}	L_{irrig}	PG_{seq}	L_{seq}	L_{irrig}	PG_{seq}	L_{seq}	L_{irrig}	PG_{seq}	L_{seq}	L_{irrig}	PG_{seq}
Dose de N (D)	40 kg ha ⁻¹	80,6 a	87,4	87,4	91,7	97,5	0	6.827	8.081 a	7.947	0,31	0,35	0,43
	80 kg ha ⁻¹	76,8 b	86,9	88,9	91,7	98,7	0	7.086	7.509 b	8.673	0,32	0,37	0,41
Fonte de N (F)	NA ⁽⁴⁾	78,2	86,9	88,6	92,1	97,0 b	0	7.239	7.519 b	7.935	0,31	0,37	0,43
	Ureia	79,3	87,3	87,7	91,2	99,2 a	0	6.674	8.071 a	8.684	0,32	0,35	0,41
Época de adubação (E)	Semeadura	80,6 a	87,2	89,7	92,1	97,9	0	7.354	7.831	8.638	0,31	0,36	0,43
	Perfilhamento	76,9 b	87,0	86,5	91,2	98,3	0	6.559	7.759	7.982	0,32	0,36	0,42
Adicional vs Fatorial	Adicional	73,2 b	88,2	87,5	91,7	96,8	0	3.887 b	5.674 b	7.069b	0,40 a	0,39	0,43
	Fatorial	78,7 a	87,1	88,1	91,7	98,1	0	6.956 a	7.795 a	8.310a	0,32 b	0,36	0,42

⁽¹⁾Tratamento adicional = testemunha sem adubação nitrogrenada. ⁽²⁾CV = coeficiente de variação. ⁽³⁾GL = graus de liberdade (nota: GL Resíduo = 16). ⁽⁴⁾NA = nitrato de amônio. ns, *, ** e *** = não significativo, significativo a $P \leq 0,05$, $P \leq 0,01$ e $P \leq 0,001$, respectivamente, pelo teste F. Individualmente para os fatores D ou F ou E, médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste F.

A cultura de trigo em Londrina apresentou alta taxa de acamamento de plantas em todos os tratamentos, inclusive na testemunha sem N, sendo o percentual de plantas acamadas superior a 91 e 97% em condições de sequeiro e irrigação, respectivamente (Tabela 4). Neste contexto, em L_{irrig} a adição de ureia aumentou em 2,2 pontos percentuais o acamamento, comparado à adubação com nitrato de amônio. Por outro lado, em PG_{seq} não foi observado este dano sobre as plantas.

A produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) apresentou médias de 6.615, 7.559 e 8.172 kg ha⁻¹ em L_{seq} , L_{irrig} e PG_{seq} , respectivamente (Tabela 4). A adubação nitrogenada aumentou a MSPA em 79% (3.069 kg ha⁻¹), 37,4% (2.121 kg ha⁻¹) e 17,6% (1.241 kg ha⁻¹) em L_{seq} , L_{irrig} e PG_{seq} . Em L_{irrig} a MSPA aumentou 7,3% com uso de ureia comparado ao nitrato de amônio; porém, ela reduziu em 7,1% quando a dose de N aumentou de 40 para 80 kg⁻¹. Por outro lado, em L_{seq} houve interação entre fonte de N e época de adubação para MSPA, sendo que a adição de nitrato de amônio na semeadura aumentou a MSPA em 24,6% comparado ao uso deste adubo no início do perfilhamento, e em 20,3% comparado à sua substituição por ureia aplicada na semeadura (Tabela 5).

Tabela 5. Desdobramento da análise de variância (ANOVA) para a interação fonte de N *versus* época de adubação, para matéria seca da parte aérea (MSPA) no estágio de florescimento da cultivar de trigo BRS Gralha-Azul, cultivada em Londrina em condição de sequeiro (L_{seq}), com duas fontes de N (nitrato de amônio e ureia) em duas épocas de adubação (semeadura e início do perfilhamento).

Época de adubação	MSPA- L_{seq} (kg ha ⁻¹)	
	Fonte de N	
	Nitrato de amônio	Ureia
Semeadura	8.031 aA	6.676 aB
Perfilhamento	6.447 bA	6.671 aA

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Student-Newman-Keuls ($P \leq 0,05$).

Em PG_{seq} , a produção de MSPA foi influenciada pela interação tripla entre os três fatores estudados (Tabela 4). Considerando a dose de 40 kg ha⁻¹ de N, a ureia apresentou o melhor resultado quando realizada na semeadura da lavoura, com incremento médio de 26,7%

de MSPA em relação à adubação no estágio de perfilhamento ou ao uso de nitrato de amônio na mesma situação (Tabela 6). Comparando as doses de N, o aumento da adubação de 40 para 80 kg ha⁻¹ aumentou a MSPA em 18,5% e 23,7%, considerando os tratamentos com aplicação de nitrato de amônio na semeadura ou ureia no estágio de perfilhamento, respectivamente.

Tabela 6. Desdobramento da análise de variância (ANOVA) para a interação tripla dose de N *versus* fonte de N *versus* época de adubação, para matéria seca da parte aérea (MSPA) no estágio de florescimento e índice de colheita aparente (ICA) da cultivar de trigo BRS Gralha-Azul, cultivada em Ponta Grossa em condições de sequeiro (PG_{seq}) com duas doses e duas fontes de N, considerando duas épocas de adubação.

Época de adubação	MSPA-PG _{seq} (kg ha ⁻¹)				ICA-PG _{seq} (kg kg ⁻¹)			
	Dose de N				Dose de N			
	40 kg ha ⁻¹		80 kg ha ⁻¹		40 kg ha ⁻¹		80 kg ha ⁻¹	
	NA ⁽¹⁾	Ureia	NA	Ureia	NA	Ureia	NA	Ureia
Semeadura	7.584 aB	9.551 aA	8.989 aA	8.427 aA	0,45 aA	0,39 bB	0,42 aA	0,44 aA
Perfilhamento	7.163 aA	7.491 bA	8.006 aA	9.270 aA	0,45 aA	0,44 aA	0,42 aA	0,37 bB
	Fonte de N				Fonte de N			
	NA		Ureia		NA		Ureia	
	40	80	40	80	40	80	40	80
	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹
Semeadura	7.584 aB	8.989 aA	9.551 aA	8.427 aA	0,45 aA	0,42 aA	0,39 bB	0,44 aA
Perfilhamento	7.163 aA	8.006 aA	7.491 bB	9.270 aA	0,45 aA	0,42 aA	0,44 aA	0,37 bB

⁽¹⁾NA = nitrato de amônio. Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna [individualmente para cada desdobramento (fonte de N/dose de N; ou dose de N/fonte de N) e maiúscula na linha (comparando NA com ureia, individualmente para cada dose de N; ou comparando 40 com 80 kg ha⁻¹ de N, individualmente para cada fonte de N), não diferem entre si pelo teste de Student-Newman-Keuls ($P \leq 0,05$).

O índice de colheita aparente (ICA) foi influenciado pelas condições ambientais, apresentando médias de 0,33, 0,36 e 0,42 kg kg⁻¹ em L_{seq}, L_{irrig} e PG_{seq} (Tabela 4). Em L_{seq} a adição de N reduziu em média 20% o ICA, comparado ao tratamento testemunha (Tabela 4). Por outro lado, em PG_{seq} houve interação tripla entre os fatores estudados para ICA. Neste

caso, o nitrato de amônio (em relação à ureia) aumentou o ICA em duas combinações: aplicado na dose de 40 kg ha⁻¹ de N no momento da semeadura, e com 80 kg ha⁻¹ de N no início do perfilhamento das plantas (Tabela 6). Além disso, comparando as duas épocas de adubação (semeadura × início do perfilhamento) e considerando somente os tratamentos com ureia, houve duas situações de redução do ICA: aplicação de 40 kg ha⁻¹ de N na semeadura da lavoura, e 80 kg ha⁻¹ de N no início do perfilhamento.

3.3.3. Absorção e eficiência de utilização de nitrogênio pelas plantas de trigo

O teor de N na MSPA variou nos três ambientes, apresentando médias de 13,9, 15,8 e 16,5 g kg⁻¹ em L_{seq}, L_{irrig} e PG_{seq}, respectivamente (Tabela 7). No entanto, ele não foi influenciado pela adubação nitrogenada, em comparação à testemunha sem adição de N. O teor de N na MSPA das plantas aumentou 5,8% em L_{irrig} e 8,9% e PG_{seq} devido ao aumento da dose de N de 40 para 80 kg ha⁻¹. Houve também influência da época da adubação sobre o teor de N na MSPA, o qual foi favorecido pela aplicação de N no estágio de início do perfilhamento em L_{irrig} (somente com uso de nitrato de amônio; Tabela 8), L_{seq} e PG_{seq} (Tabela 7) com incrementos de 19, 12 e 16,4%, respectivamente, em relação à adubação realizada na semeadura da lavoura. Além disso, em L_{irrig} a adubação com ureia aumentou em 9,8% o teor de N na MSPA em comparação com a aplicação de nitrato de amônio, ambas realizadas na semeadura da lavoura (Tabela 8).

Tabela 7. Significância da análise de variância (ANOVA) dos efeitos principais [dose de N (D), fonte de N (F), e época de adubação (E)] e de suas interações; e médias de teor e conteúdo de nitrogênio (N) na matéria seca da parte aérea (MSPA) no estágio de florescimento, e eficiências de utilização de N (EUN) para rendimento de grãos (RG) e para produção de MSPA da cultivar de trigo BRS Gralha-Azul, cultivada em três ambientes [Londrina-sequeiro (L_{seq}), Londrina-irrigado (L_{irrig}) e Ponta Grossa-sequeiro (PG_{seq})], com duas doses e duas fontes de N, considerando duas épocas de adubação.

Fonte de variação	GL ⁽³⁾	Teor de N na MSPA			Conteúdo de N na MSPA			EUN para MSPA			EUN para RG		
		L_{seq}	L_{irrig}	PG_{seq}	L_{seq}	L_{irrig}	PG_{seq}	L_{seq}	L_{irrig}	PG_{seq}	L_{seq}	L_{irrig}	PG_{seq}
Bloco	2	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Dose de N (D)	1	ns	*	**	ns	ns	**	ns	**	ns	ns	ns	**
Fonte de N (F)	1	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns
Época de adubação (E)	1	**	***	***	ns	**	ns	**	*	***	ns	*	**
D x F	1	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
D x E	1	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns
F x E	1	ns	**	ns	ns	***	ns	*	ns	ns	ns	**	ns
D x F x E	1	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns
Adicional vs Fatorial ⁽¹⁾	1	ns	ns	ns	***	***	ns	***	***	**	***	*	ns
CV (%) ⁽²⁾		9,9	5,6	6,0	14,7	7,7	12,9	15,6	11,5	10,7	15,4	13,1	13,9

Fator	Tratamento	Teor de N na MSPA (g kg ⁻¹)			Conteúdo de N na MSPA (kg ha ⁻¹)			EUN para MSPA (kg ² g ⁻¹ ha ⁻¹)			EUN para RG (kg kg ⁻¹)		
		L_{seq}	L_{irrig}	PG_{seq}	L_{seq}	L_{irrig}	PG_{seq}	L_{seq}	L_{irrig}	PG_{seq}	L_{seq}	L_{irrig}	PG_{seq}
Dose de N (D)	40 kg ha ⁻¹	13,7	15,4 b	15,7 b	93	124	124 b	510	529 a	515	33,4	35,1	49,4 a
	80 kg ha ⁻¹	14,4	16,3 a	17,1 a	102	122	149 a	498	464 b	511	32,9	36,9	41,9 b
Fonte de N (F)	NA ⁽⁴⁾	14,2	15,7	16,7	101	118	132	525	485	484	32,7	37,5	47,2
	Ureia	13,9	16,0	16,2	93	129	140	482	509	542	33,6	34,4	44,2
Época de adubação (E)	Semeadura	13,3 b	15,0	15,2 b	97	118	131	558	523 a	573	33,7	38,4	49,3 a
	Perfilhamento	14,9 a	16,6	17,7 a	97	129	141	449	470 b	453	32,6	33,6	42,1 b
Adicional vs Fatorial	Adicional	12,5	15,3	17,5	49 b	87 b	124	310 b	372 b	404 b	53,1 a	42,3 a	43,2
	Fatorial	14,1	15,8	16,4	97 a	123 a	136	504 a	497 a	513 a	33,1 b	36,0 b	45,7

⁽¹⁾Tratamento adicional = testemunha sem adubação nitrogenada. ⁽²⁾CV = coeficiente de variação. ⁽³⁾GL = graus de liberdade (nota: GL Resíduo = 16). ⁽⁴⁾NA = nitrato de amônio. ns, *, ** e *** = não significativo, significativo a $P \leq 0,05$, $P \leq 0,01$ e $P \leq 0,001$, respectivamente, pelo teste F. Individualmente para os fatores D ou F ou E, médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste F.

Tabela 8. Desdobramento da análise de variância (ANOVA) para a interação fonte de N *versus* época de adubação, para teor e conteúdo de N na matéria seca da parte aérea (MSPA) no estágio de florescimento, e eficiências de utilização de N (EUN) para RG e para produção de MSPA da cultivar de trigo BRS Gralha-Azul, cultivada em dois ambientes [Londrina-sequeiro (L_{seq}) e Londrina-irrigado (L_{irrig})], com duas fontes de N [nitrato de amônio (NA) e ureia] em duas épocas de adubação (semeadura e início do perfilhamento).

Época de adubação	Fonte de N			
	Nitrato de amônio	Ureia	Nitrato de amônio	Ureia
	Teor de N na MSPA- L_{irrig}		Conteúdo de N na MSPA- L_{irrig}	
	(g ka ⁻¹)		(kg ha ⁻¹)	
Semeadura	14,3 bB	15,7 aA	105 bB	131 aA
Perfilhamento	17,0 aA	16,2 aA	131 aA	126 aA
	EUN para MSPA- L_{seq}		EUN para RG- L_{irrig}	
	(kg ² g ⁻¹ ha ⁻¹)		(kg kg ⁻¹)	
Semeadura	620,3 aA	496,4 aB	42,7 aA	34,1 aB
Perfilhamento	430,5 bA	467,7 aA	32,4 bA	34,7 aA

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Student-Newman-Keuls ($P \leq 0,05$).

O acúmulo de N na MSPA foi fortemente influenciado pelo ambiente, cujas médias foram de 92, 119 e 135 kg ha⁻¹ em L_{seq} , L_{irrig} e PG_{seq} (Tabela 7). Além disso, a adubação nitrogenada aumentou o conteúdo de N na MSPA em 98 e 41,4% em L_{seq} e L_{irrig} respectivamente, em relação à testemunha sem adição de N. Comparando as doses de N, o aumento de 40 para 80 kg ha⁻¹ elevou em 20,1% o conteúdo de N na MSPA em PG_{seq} , sem alterações nos outros ambientes. Em L_{irrig} a adubação com ureia na semeadura da lavoura aumentou em 24,8% o conteúdo de N na MSPA, em comparação ao uso de nitrato de amônio na mesma situação (Tabela 8). Além disso, o efeito do nitrato de amônio foi influenciado pela época de adubação em L_{irrig} , cuja aplicação no início do perfilhamento das plantas proporcionou aumento de 25% do conteúdo de N na MSPA, em relação à sua aplicação junto com a semeadura da lavoura (Tabela 8).

A EUN para produção de MSPA (EUN_{MSPA}) foi pouco influenciada pelo ambiente, resultando em médias de 482, 483 e 500 $kg^2 g^{-1} ha^{-1}$ em L_{seq} , L_{irrig} e PG_{seq} , respectivamente (Tabela 7). No entanto, ela foi aumentada pela adubação nitrogenada em 63, 34 e 27% em L_{seq} , L_{irrig} e PG_{seq} , em comparação à testemunha sem adição de N (Tabela 7). A aplicação de N durante a semeadura da lavoura aumentou a EUN_{MSPA} em média de 44% (somente para nitrato de amônio; Tabela 8), 11,3% (Tabela 7) e 38,3% (para ureia/40 $kg ha^{-1}$ de N, e nitrato de amônio; Tabela 9) em L_{seq} , L_{irrig} e PG_{seq} , respectivamente, em comparação à adubação realizada no início do perfilhamento das plantas.

O aumento da dose de N de 40 para 80 $kg ha^{-1}$ em L_{irrig} (Tabela 7) e em PG_{seq} (somente para ureia/semeadura; Tabela 9) reduziu a EUN_{MSPA} em 12,3 e 20,6%, respectivamente. Além disso, em L_{seq} a aplicação de nitrato de amônio na semeadura da lavoura aumentou em 25,4% a EUN_{MSPA} , quando comparado com ureia nas mesmas condições (Tabela 8); sendo que efeito contrário foi observado em PG_{seq} , pois houve redução de 18,5% da EUN_{MSPA} quando a ureia foi substituída por NA (considerando somente a dose de 40 $kg ha^{-1}$ de N na semeadura) (Tabela 9).

A EUN para rendimento de grãos (EUN_{RG}) apresentou menores valores em Londrina comparado com Ponta Grossa, com médias de 35,4, 36,7 e 45,4 $kg kg^{-1}$ em L_{seq} , L_{irrig} e PG_{seq} (Tabela 7). Neste contexto, a adubação nitrogenada reduziu a EUN_{RG} somente em Londrina, com decréscimos médios de 38 e 15% em L_{seq} e L_{irrig} , respectivamente (Tabela 7). As doses, fontes e épocas de aplicação de N não influenciaram a EUN_{RG} em L_{seq} . No entanto, em PG_{seq} a adubação realizada na semeadura da lavoura aumentou em 17,1% a EUN_{RG} , comparado com a adição de N no início do perfilhamento das plantas; enquanto o aumento da dose de N de 40 para 80 $kg ha^{-1}$ promoveu um decréscimo de 15,7% desta EUN_{RG} (Tabela 7). Finalmente, em L_{irrig} o nitrato de amônio aplicado na semeadura da lavoura proporcionou a maior EUN_{RG} , com o valor de 42,7 $kg kg^{-1}$, ou seja, em média 26,7% superior em relação às outras combinações entre fonte de N e época de adubação nitrogenada (Tabela 8).

Tabela 9. Desdobramento da análise de variância (ANOVA) para a interação tripla dose de N *versus* fonte de N *versus* época de adubação, para eficiência de utilização de N (EUN) para produção de MSPA no estágio de florescimento da cultivar de trigo BRS Gralha-Azul, cultivada em Ponta Grossa em condições de sequeiro (PG_{seq}) com duas doses e duas fontes de N, considerando duas épocas de adubação.

Época de adubação	EUN para MSPA–PG _{seq} (kg ² g ⁻¹ ha ⁻¹)			
	Dose de N			
	40 kg ha ⁻¹		80 kg ha ⁻¹	
	NA ⁽¹⁾	Ureia	NA	Ureia
Semeadura	538 aB	660 aA	569 aA	524 aA
Perfilhamento	410 bA	451 bA	417 bB	533 aA
	Fonte de N			
	NA		Ureia	
	40 kg ha ⁻¹	80 kg ha ⁻¹	40 kg ha ⁻¹	80 kg ha ⁻¹
Semeadura	538 aA	569 aA	660 aA	524 aB
Perfilhamento	410 aA	417 bA	451 bA	533 aA

⁽¹⁾NA = nitrato de amônio. Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna [individualmente para cada desdobramento (fonte de N/dose de N; ou dose de N/fonte de N) e maiúscula na linha (comparando NA com ureia, individualmente para cada dose de N; ou comparando 40 com 80 kg ha⁻¹ de N, individualmente para cada fonte de N), não diferem entre si pelo teste de Student-Newman-Keuls ($P \leq 0,05$).

3.4. DISCUSSÃO

3.4.1. Influência das condições ambientais sobre a cultura do trigo

O ambiente de Ponta Grossa foi o mais favorável à cultura do trigo, possibilitando alto rendimento médio de grãos, 91% superior à média de Londrina, ambos em condições de sequeiro. Isto pode ser atribuído principalmente às melhores condições de disponibilidade hídrica (baixo déficit hídrico) e à temperatura mais amena, que favoreceram esta cultura de

inverno. De fato, a semeadura mais tardia (em 30 de junho) em Ponta Grossa permitiu que sua fase de perfilhamento ocorresse sob temperaturas mais baixas, que favoreceram a emissão de perfilhos e, conseqüentemente, a produção de espigas férteis (em média 38% superior em relação a L_{seq}), que é um dos principais componentes de rendimento do trigo (LORENZO et al., 2015; ZHANG et al., 2020). Além disso, a melhor disponibilidade de água no solo em Ponta Grossa favoreceu a absorção de nutrientes como o N, que é fundamental para o aumento do perfilhamento das plantas (YOUSAF et al., 2014) e, conseqüentemente, para a formação de grãos. Por outro lado, o peso hectolítrico e o PMG foram muito similares nas condições de sequeiro dos dois locais experimentais, não influenciando as diferenças de produtividade entre eles.

O suprimento adicional de água (por meio de irrigação) foi decisivo para ao aumento de 38% do rendimento médio de grãos em Londrina. Esta melhor oferta hídrica resultou em aumento do perfilhamento e, conseqüentemente, da formação de espigas férteis (aumento médio de 18%), além do aumento da absorção de N, o que parcialmente explica a melhor produtividade do trigo em L_{irrig} . Considerando que o PMG foi reduzido pela irrigação em Londrina, outros componentes do rendimento de grãos provavelmente foram os responsáveis pela maior produtividade em L_{irrig} , tais como número de espiguetas/espiga e/ou número de grãos/espiga, além do número de espigas m^{-2} . Maqbool et al. (2015) também obtiveram aumento destes componentes de rendimento com uso de irrigação em lavoura de trigo, corroborando nosso resultado. Assim, o rendimento de grãos está fortemente relacionado à interação entre características genéticas da planta e o ambiente em que a lavoura é cultivada (DU et al., 2020).

A altura de planta foi reduzida pelo maior déficit hídrico em L_{seq} , comparado aos outros dois ambientes. De fato, o turgor hídrico é componente fundamental para a expansão celular (ZUBAIROVA et al., 2016) e conseqüente alongamento do colmo da planta de trigo. Colmos mais curtos geralmente são estruturalmente mais resistentes (PIÑERA-CHAVES et al., 2016), o que ajuda a explicar a menor taxa de acamamento da lavoura em L_{seq} comparado a L_{irrig} .

O acamamento de plantas foi nulo em PG_{seq} , mesmo apresentando maior altura de planta, DPF, carga (rendimento) de grãos e conteúdo de N na MSPA, além da melhor oferta hídrica neste ambiente em relação a L_{seq} , ou seja, mesmo a lavoura exposta a esses fatores que favorecem o acamamento (MA et al., 2016; KHAN et al., 2020), ela permaneceu resistente a este dano. Outro fator que aumenta a taxa de acamamento é o excesso e a velocidade do vento (MA et al., 2016). Porém, as rajadas de vento foram menores no ambiente com maior

acamamento, ou seja, os maiores valores foram 15 m s^{-1} em Londrina (18/08/2016 = 111° dia do ciclo) e $42,5 \text{ m s}^{-1}$ em Ponta Grossa (19/10/2016 = 111° dia do ciclo), ambos no estágio intermediário de formação de grãos (dados não apresentados). Portanto, a tolerância ao acamamento da lavoura em Ponta Grossa está provavelmente associada à maior resistência do colmo, indiretamente deduzida pelo maior acúmulo de MSPA neste ambiente. Neste contexto, Zhang et al. (2017) avaliaram a estrutura do colmo e concluíram que plantas de trigo que apresentam as células do colmo com parede celular mais espessa e entrenós basais mais densos são menos suscetíveis ao acamamento, e que estas características podem ser melhoradas com o uso adequado do N. Além disso, de acordo com Chen et al. (2018) e Khan et al. (2020), a otimização do uso de N é capaz de reduzir os problemas com acamamento, inclusive em cultivares suscetíveis, devido ao favorecimento do acúmulo de lignina e celulose, e consequente diminuição nos índices de quebra do colmo da planta de trigo.

Em regiões caracterizadas como sendo de clima quente, como é o caso da macrorregião tritícola 3 (CBPTT, 2016) à qual pertence o município de Londrina, elevadas temperaturas associadas a alta disponibilidade hídrica contribuem para uma maior mineralização do N orgânico do solo e para a decomposição da palhada da cultura anterior, favorecendo a maior absorção de N e o crescimento das plantas que, por sua vez, propiciam aumento do acamamento. Já em regiões de clima frio, como a macrorregião tritícola 1, na qual está inserido o município de Ponta Grossa, o crescimento das plantas é mais lento e o estiolamento do colmo é menor. Além disso, a menor velocidade da mineralização do N orgânico sob temperaturas mais amenas também contribui para minimizar o acamamento de plantas (FOLONI et al., 2014; SILVA et al., 2016).

A melhor oferta hídrica em L_{irrig} e PG_{seq} (comparadas a L_{seq}) aumentaram proporcionalmente mais o rendimento de grãos do que a MSPA, o que é sintetizado pelos valores de ICA, que foram maiores nos ambientes com menor déficit hídrico. Portanto, as plantas alocaram maior quantidade de biomassa para a formação de grãos à medida que a água não era um fator limitante para processos vitais, como a absorção de nutrientes, atividade fotossintética e translocação de fotoassimilados para a formação de grãos. Resultados semelhantes foram observados por Campoy et al. (2020) em lavouras de trigo sob condição irrigada e de sequeiro, com ICA de 0,52 e 0,31, respectivamente, demonstrando que a razão entre a produção de matéria seca na parte aérea e nos grãos é dependente da disponibilidade de água à cultura.

O teor de N na MSPA no estágio de florescimento foi maior nos ambientes com menor déficit hídrico (L_{irrig} e PG_{seq}). Portanto, considerando que o teor de N apresenta alta correlação

com a atividade metabólica celular (EPSTEIN e BLOOM, 2005), este fato ajuda a explicar os maiores rendimentos de grãos nestes ambientes comparados a L_{seq} .

A absorção de N pelas plantas pode ser avaliada indiretamente por meio do conteúdo de N acumulado na biomassa vegetal. No presente estudo, verificamos maior conteúdo de N na MSPA em L_{irrig} e PG_{seq} , comparados a L_{seq} , ou seja, a absorção de N foi comprometida pelo maior déficit hídrico neste último local. No entanto, o acúmulo (conteúdo) de N foi proporcionalmente mais reduzido pelo déficit hídrico do que o teor deste nutriente, indicando a ocorrência de um baixo efeito de diluição de N para produção de MSPA nos ambientes com maior oferta hídrica (L_{irrig} e PG_{seq}). Por outro lado, a maior absorção de N na MSPA foi fundamental para o aumento do rendimento de grãos, considerando os maiores valores de EUN_{RG} nos ambientes com menor déficit hídrico, especialmente em PG_{seq} , cujo valor médio de EUN_{RG} foi 28,2% maior do que em L_{seq} .

3.4.2. Efeitos da adubação nitrogenada na cultura do trigo

Em uma análise geral da adubação nitrogenada, comparando a média dos tratamentos que receberam N com o tratamento testemunha (sem adição de N), verificamos aumentos expressivos de rendimento de grãos e de MSPA nos três ambientes, com maiores incrementos percentuais (principalmente para MSPA) no local com maior déficit hídrico, ou seja, em L_{seq} . Isto pode ser atribuído ao aumento da concentração de N mineral (NH_4^+ e NO_3^-) na solução do solo (em períodos de melhor disponibilidade hídrica), proveniente da dissolução dos fertilizantes, resultando no aumento de seu transporte no solo (principalmente pelo mecanismo de fluxo de massa) e de sua absorção pela planta, considerando um mesmo volume de água disponível no solo ou evapotranspirada. Portanto, nos ambientes com maior restrição de N (seja de N nativo do solo ou devido à deficiência de N induzida por déficit hídrico), as respostas à adubação nitrogenada foram proporcionalmente maiores. Além disso, L_{seq} foi o único ambiente com incremento da DPF em resposta à adição de N, o que justifica a maior taxa de resposta da lavoura para aumentar o rendimento de grãos e a produção de MSPA.

O aumento do PMG devido à adubação nitrogenada em L_{irrig} contribuiu para o aumento do rendimento de grãos neste ambiente. Além disso, como L_{seq} e PG_{seq} apresentaram maiores valores médios de PMG (~36 g) comparado com L_{irrig} (31,9 g), verifica-se que havia uma oportunidade para aumento do PMG nesse ambiente irrigado. O decréscimo do PMG em ambientes irrigados foi observado por Yan et al. (2019) quando a adubação foi fornecida em

quantidade menor do que a necessária para o bom desenvolvimento do trigo, uma vez que a deficiência nutricional, principalmente do N, tem como resultado a produção de grãos mais leves, mesmo que a cultura esteja sob boa disponibilidade hídrica.

A altura média de planta aumentou nos tratamentos adubados com N, porém, apenas em L_{seq} . Isto deve-se ao aumento da concentração de N na solução do solo, como discutido anteriormente. Em L_{irrig} e PG_{seq} , a maior disponibilidade de água no solo provavelmente favoreceu a mineralização da matéria orgânica e a decomposição da palhada da soja resultando em maior oferta de N para absorção pelas plantas em níveis suficientes para elas atingirem maiores alturas. Zagonel e Fernandes (2007) observaram plantas mais altas em tratamento com maior dose de N (240 kg ha^{-1}); ao passo que Pietro-Souza et al. (2013) verificaram maiores alturas em plantas cultivadas com aplicação de 240 a 300 kg ha^{-1} de N.

O acamamento de plantas não foi influenciado pela adubação nitrogenada. Isto não era esperado, pois o N exerce forte influência no aumento deste dano, como observado em vários trabalhos (TEIXEIRA FILHO et al., 2007; ZHANG et al., 2017; WU et al., 2019). Em Londrina, todos os tratamentos apresentaram alta taxa de acamamento, indicando que outros fatores (além de N) foram determinantes para a ocorrência deste dano. Considerando a média regional de aproximadamente 2.500 kg ha^{-1} de grãos de trigo (CONAB 2020a), constata-se que houve elevados rendimentos em L_{seq} (3.317 kg ha^{-1}) e L_{irrig} (4.291 kg ha^{-1}), cujo peso de grãos associado à boa disponibilidade hídrica no final do ciclo pode ter predisposto a lavoura ao acamamento. No caso de PG_{seq} , a ausência de acamamento foi atribuída à maior resistência do colmo, como comentado anteriormente.

A adubação nitrogenada não alterou o teor de N na MSPA. Portanto, os incrementos de conteúdo de N na MSPA são o resultado exclusivo do aumento de produção de biomassa vegetal, ou seja, de MSPA no estágio de florescimento. Deste modo, há indicações de que a planta possui um tampão fisiológico para manter o teor de N nos tecidos vegetais dentro de uma faixa de suficiência adequada.

Os incrementos de MSPA foram proporcionalmente maiores do que os aumentos de rendimentos de grãos em resposta à adubação nitrogenada. Como resultado destes achados, houve aumentos da EUN_{MSPA} nos três ambientes e redução da EUN_{RG} em L_{seq} e L_{irrig} . Estas alterações de EUN foram expressivas em L_{seq} , pois este foi o ambiente proporcionalmente mais responsivo à adubação nitrogenada em termos de rendimentos de grãos, produção de MSPA e acúmulo de N na biomassa vegetal. Portanto, a EUN é fortemente controlada pelas condições ambientais, especialmente pela disponibilidade hídrica, o que influencia diretamente o potencial de resposta da planta à adubação nitrogenada.

3.4.3. Manejo de nitrogênio na adubação da lavoura de trigo

O manejo de N na adubação da cultura do trigo considerou a combinação de doses, fontes e épocas de aplicação de adubos nitrogenados, assim como suas interações, que foram frequentes, porém, específicas para cada um dos três ambientes avaliados. Assim, a discussão destes resultados foi organizada de modo a contemplar a influência das condições ambientais sobre os efeitos dos fatores estudados, abordando de maneira mais abrangente os achados do trabalho.

O rendimento de grãos de trigo não foi influenciado pelas formas de manejo de N, ou seja, ele foi indiferente à aplicação de 40 ou 80 kg ha⁻¹ de N (exceto em PG_{seq}, onde 80 kg ha⁻¹ de N resultou em maior rendimento), na forma de nitrato de amônio ou ureia, durante a semeadura ou no início do perfilhamento da cultura. Isto demonstra que as exigências nutricionais em N das lavouras foram supridas com apenas 40 kg ha⁻¹ do nutriente em L_{seq} e L_{irrig}, independente da fonte ou época de adubação. Este resultado não era esperado, pois as doses de N foram baseadas nas indicações técnicas para a cultura do trigo no estado do Paraná (CBPTT, 2016), que preconizam que a quantidade total de N a ser aplicada (somando as adubações de base e de cobertura) varia entre 40 e 90 kg ha⁻¹. No entanto, considerando os altos rendimentos de grãos obtidos nos três ambientes, pode-se inferir que o N não foi limitante à produtividade da cultura. Portanto, parte significativa do N absorvido pelas plantas foi proveniente do N nativo do solo e da palhada da cultura anterior. De fato, as condições de baixo déficit hídrico e as temperaturas amenas (médias de 17,6 °C em Londrina e 16,4 °C Ponta Grossa) favoreceram a atividade microbiana, possibilitando a mineralização da matéria orgânica do solo e a decomposição da palhada da soja, que foram importantes para disponibilizar N adicional às plantas. Neste sentido, havia grande quantidade de palhada da leguminosa em Londrina (4550 kg ha⁻¹) e Ponta Grossa (5870 kg ha⁻¹) no momento da semeadura, representando uma potencial fonte de N para as plantas.

Viola et al. (2013) demonstraram em experimento com trigo cultivado sobre palhada de nabo forrageiro ou ervilhaca, que nem sempre a adição de N mineral proporciona incremento de rendimento de grãos, uma vez que, dependendo da cultura antecessora e das condições ambientais, o N fornecido pela mineralização pode ser suficiente para suprir as necessidades da cultura.

Estudos recentes demonstraram correlação positiva entre rendimento de grãos de trigo e doses adequadas de N, porém, somente até um limite, uma vez que o nutriente fornecido em

excesso não incrementa a produtividade da lavoura (MONTROYA et al., 2020) ou até mesmo pode reduzi-la, principalmente quando possui alta densidade de plantas (LIU et al., 2021).

Analisando as demais características agronômicas e nutricionais da lavoura de trigo, verifica-se que elas foram influenciadas por pelo menos uma das três formas de manejo da adubação nitrogenada, com exceção do peso hectolítrico que permaneceu inalterado.

O aumento da dose de N de 40 para 80 kg ha⁻¹ favoreceu em algumas situações e ambientes a DPF (PG_{seq}), a MSPA (PG_{seq}), o teor (L_{irrig} e PG_{seq}) e o conteúdo (PG_{seq}) de N na MSPA no florescimento. Porém, em outras situações ele reduziu a altura de planta (L_{seq}), a MSPA (L_{irrig}), a EUN_{MSPA} (L_{irrig}) e a EUN_{RG} (PG_{seq}).

O aumento da DPF com o incremento da dose de N é resultado do aumento do perfilhamento da lavoura com o suprimento adicional de N, como observado em outros trabalhos (SHIRAZI et al., 2014; YANG et al., 2019).

As reduções de altura de planta e da MSPA em função do aumento da adição de N de 40 para 80 kg ha⁻¹ não eram esperadas. Provavelmente elas estão associadas a algum desequilíbrio nutricional ocasionado por excesso de N. Neste contexto, na literatura são frequentemente relatados efeitos positivos do aumento do suprimento de N sobre a altura e acúmulo de biomassa em plantas de trigo (PRADHAN et al., 2018; SI et al., 2020), ao passo que efeitos negativos foram verificados apenas com a aplicação de elevadas doses de N (≥ 180 kg ha⁻¹), como verificado por Lu et al. (2015) e Si et al. (2020).

Os aumentos de teor e de acúmulo de N na MSPA em resposta ao aumento da dose de N eram esperados em todas as três áreas experimentais, porém, eles ocorreram apenas nos ambientes com maior oferta hídrica (L_{irrig} e/ou PG_{seq}), resultando em decréscimos de EUN_{MSPA} (L_{irrig}) ou EUN_{RG} (PG_{seq}), que são frequentes em condições de campo (ZHENG et al., 2017). Isto reforça que a disponibilidade de água no solo é um fator determinante da taxa de aproveitamento dos adubos nitrogenados pelas plantas (SHIRAZI et al., 2014). Portanto, a definição da dose de N deveria considerar o histórico do balanço hídrico na região de cultivo de trigo, de modo a maximizar a relação custo \times benefício. Neste contexto, o principal objetivo do triticultor é o aumento do rendimento de grãos associado ao menor consumo de fertilizantes, o que pode ser estimado por meio da EUN_{RG}. O aumento do conteúdo de N na MSPA associado com a redução da EUN_{RG} em PG_{seq} é justamente uma situação não desejada, pois não houve resposta de rendimento de grãos devido ao aumento da dose de 40 para 80 kg ha⁻¹ de N.

A EUN_{RG} é uma característica agronômica relacionada à genética. Portanto, a seleção de cultivares de trigo considerando esta característica permite a racionalização de práticas de

adubação, ou seja, maximizar o rendimento de grãos com menor consumo de fertilizantes nitrogenados, aumentando a remuneração do agricultor; além disso, diminui potenciais impactos ambientais, como a eutrofização de mananciais hídricos (COHAN et al., 2019).

As fontes de N afetaram várias características da cultura do trigo, sendo influenciadas pelas condições ambientais. Porém, esses efeitos foram observados predominantemente nos desdobramentos das interações com outros fatores de manejo de N (dose e época de adubação). Assim, o nitrato de amônio apresentou melhores efeitos sobre aumentos do PMG em L_{irrig} (na semeadura), ICA em PG_{seq} (40 kg ha⁻¹ de N/semeadura; 80 kg ha⁻¹ de N/perfilhamento), EUN_{MSPA} em L_{seq} (na semeadura) e EUN_{RG} em L_{irrig} (em algumas combinações de fatores); além de ter proporcionado menor acamamento de plantas em L_{irrig} . Por sua vez, a adubação com ureia apresentou melhores resultados para aumentar o PMG em L_{seq} (para 80 kg ha⁻¹ de N), MSPA em L_{irrig} e PG_{seq} (na semeadura), teor de N na MSPA em L_{irrig} (na semeadura), conteúdo de N na MSPA em L_{irrig} (na semeadura) e EUN_{MSPA} em PG_{seq} (para 40 kg ha⁻¹ de N). Portanto, os efeitos de fontes de N sobre as características avaliadas foram variáveis e inconclusivos. Contudo, verificamos que as diferenças entre as fontes de N se espessam predominantemente quando a adubação foi realizada na semeadura da lavoura de trigo. Além disso, os melhores efeitos do uso de ureia ocorreram com mais frequência em ambientes com menor déficit hídrico ao longo do ciclo da cultura, isto é, em L_{irrig} e PG_{seq} .

A opção pelo uso de ureia é mais adequada para ambientes com maior oferta hídrica logo após sua adubação, pois sua rápida solubilização e infiltração no solo reduz as perdas de N por volatilização de NH₃ (LARA CABEZAS et al., 1997; SANTOS et al., 2020). Além disso, a incorporação da ureia no solo durante a semeadura também é outra prática de manejo adotada para reduzir a volatilização e aumentar a eficiência agronômica deste fertilizante; entretanto, devido ao seu índice salino e à produção de gás amônia (tóxico) durante a transformação do N-amídico em N-amoniaco, a ureia deve ser colocada a uma distância mínima de 2,5 cm das sementes (WIETHÖLTER, 2011; FOLONI et al., 2014). No presente estudo, houve condições desfavoráveis à ocorrência de volatilização de NH₃ após a adubação de cobertura realizada no início do perfilhamento da lavoura em Londrina, pois houve 78,3 mm de chuvas nos quatro dias seguintes a esta adubação, incorporando a ureia no solo. Por sua vez, em Ponta Grossa a superfície do solo e a palhada de soja permaneceram secas nos 11 dias subsequentes à realização da adubação de cobertura, e o pH do solo era muito ácido (4,7) inibindo a atividade da enzima urease (PERIN et al., 2020). Portanto, essas condições ambientais desfavoreceram as perdas de N por volatilização de NH₃, aproximando as taxas de eficiência agronômica das duas fontes de N.

Uma vez que as duas fontes de N apresentaram eficiência equivalente, a escolha poderia ser realizada com base no custo por unidade de N. Em abril de 2020, o preço médio praticado no Estado do Paraná foi de R\$ 1812 e R\$ 1800 por tonelada de ureia e nitrato de amônio, respectivamente. Portanto, o custo por quilo de N presente na ureia foi R\$ 1,43 inferior ao nitrato de amônio (CONAB, 2020c). Dessa forma, a escolha da ureia como fonte de N pode proporcionar redução de 26% no custo com a fertilização nitrogenada.

Finalmente, considerando a época de adubação, os melhores resultados foram predominantemente obtidos com a aplicação de N no momento da semeadura, havendo maior magnitude de aumento de PMG em L_{irrig} (com uso de nitrato de amônio) e PG_{seq} , altura de planta em L_{seq} , MSPA em PG_{seq} (com uso de nitrato de amônio), EUN_{MSPA} em L_{irrig} , L_{seq} (com uso de nitrato de amônio) e PG_{seq} (com uso de 40 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia), e EUN_{RG} em PG_{seq} . Por sua vez, a adubação nitrogenada no início do perfilhamento da lavoura resultou em maiores incrementos de teor de N na MSPA em L_{seq} , L_{irrig} (com uso de nitrato de amônio) e PG_{seq} , e de conteúdo de N na MSPA em L_{irrig} (com uso de nitrato de amônio). Analisando estas informações, é evidente a maior frequência de efeitos de época de adubação nos tratamentos com uso de nitrato de amônio (comparado a ureia), indicando que a melhor época de adubação nitrogenada do trigo pode ser influenciada pela fonte de N.

Adubação nitrogenada realizada exclusivamente na semeadura da lavoura do trigo geralmente não é uma prática eficiente para maximizar o rendimento de grãos e a produção de MSPA (dentre outras características agronômicas). Alguns trabalhos reportam maiores rendimentos de grãos de trigo quando a adubação nitrogenada é realizada em cobertura (parcelada ou em dose única) em estádios fenológicos a partir do início do perfilhamento das plantas (SHIRAZI et al., 2014; SI et al., 2020). Porém, de acordo com nossas pesquisas bibliográficas não há trabalhos demonstrando vantagens da adubação nitrogenada exclusiva no momento da semeadura sobre o incremento do rendimento de grãos e outras características agronômicas da lavoura de trigo. Esta é uma informação relevante, pois em ambientes com baixa propensão à lixiviação de NO_3^- , a adubação exclusiva na semeadura pode ser uma prática vantajosa (deste que a dose de N não ocasione alto efeito salino que prejudique a germinação e desenvolvimento das plântulas), pois reduz o número de operações mecanizadas utilizadas em adubações de cobertura, o que reduz o custo de produção e a ocorrência de compactação do solo pelos rodados das máquinas. Por outro lado, em solos mais arenosos e ambientes com altas precipitações pluviais, as perdas de N por lixiviação são intensas, o que significa que a adubação nitrogenada deve ser parcelada, de modo a sincronizar a oferta com a demanda de N pela lavoura ao longo de seu ciclo de crescimento.

Por outro lado, os maiores valores de teor e de conteúdo de N na MSPA obtidos nos tratamentos adubados no estágio de início do perfilhamento, podem ser uma vantagem quando o objetivo é aumentar o teor de proteínas nos grãos de trigo, como reportado por Lollato et al. (2021) em outro experimento. Isto se torna mais importante para o agricultor quando há um bônus/prêmio pago pela indústria de panificação por trigo com maior teor de glúten.

Portanto, a decisão de como manejar a adubação nitrogenada depende fortemente das condições ambientais esperadas ao longo do ciclo da cultura, especialmente da disponibilidade hídrica, e deve considerar uma estratégia que possibilite o melhor retorno econômico, seja por meio da redução de custos ou do aumento do rendimento e/ou qualidade dos grãos produzidos.

3.5. CONCLUSÕES

O manejo da fertilização nitrogenada deve levar em consideração o histórico das condições ambientais durante o ciclo do trigo em cada ambiente.

A dose de N pode ser reduzida em condições ambientais mais quentes e úmidas que favorecem a mineralização da matéria orgânica do solo e a decomposição da palha da soja.

A opção pela ureia ou nitrato de amônio pode ser baseada em critérios econômicos em ambientes com baixo déficit hídrico e baixo potencial de volatilização de NH_3 .

A fertilização nitrogenada realizada exclusivamente na semeadura do trigo pode ser adequada para suprir as necessidades de N da cultura, reduzindo os custos operacionais.

3.6 REFERÊNCIAS

AMANULLAH; ULLAH, H.; ELSHIKH, M. S.; ALWAHIBI, M. S.; ALKAHTANI, J.; MUHAMMAD, A.; KHALID, S.; IMRAN. Nitrogen Contents in soil, grains, and straw of hybrid rice differ when applied with different organic nitrogen sources. **Agriculture**, Basel, v. 10, 386, 2020.

BALIGAR, V. C.; FAGERIA, N. K.; HE, Z. L. Nutrient use efficiency in plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, London, v. 32, n. 7–8, p. 921–950, 2001.

BASSOI, M. C.; FOLONI, J. S. S. Comunicado Técnico 82: Cultivar de trigo BRS Gralha-Azul: características e desempenho agrônomo. **Embrapa**. Londrina, 2015.

BOSCHIERO, B. N.; MARIANO, E.; TRIVELIN, P. C. O. “Preferential” ammonium uptake by sugarcane does not increase the ^{15}N recovery of fertilizer sources. **Plant Soil**, New York, v. 429, p. 253–269, 2018.

CAMPOY, J.; CAMPOS, I.; PLAZA, C.; CALERA, M.; BODAS, V.; CALERA, A. Estimation of harvest index in wheat crops using a remote sensing-based approach. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 256, 107910, 2020.

CHEN, X.; WANG, Z.; LI, W.; WANG, C.; YAN, S.; LI, H.; ZHANG, A.; TANG, Z.; WEI, M. Optimized nitrogen fertilizer application mode increased culms lignin accumulation and lodging resistance in culms of winter wheat. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 228, p. 31–38, 2018.

CHEN, X. X.; ZHANG, W.; LIANG, X. Y.; LIU, Y. M.; XU, S. J.; ZHAO, Q. Y.; DU, Y. F.; ZHANG, L.; CHEN, X. P.; ZOU, C. Q. Physiological and developmental traits associated with the grain yield of winter wheat as affected by phosphorus fertilizer management. **Scientific Reports**, London, v. 9, 16580, 2019.

CHEN, Z.; WANG, H.; LIU, X.; CHEN, X.; LU, D.; JIA, Y.; ZHOU, J. Spatial and temporal nitrogen applications for winter wheat in a loamy soil in south-eastern China. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, New York, v. 109, p. 43–55, 2017.

CLUNES, J.; PINOCHET, D. Effect of slow-release nitrogen on the nitrogen availability in na andisol and the critical nitrogen concentration in wheat. **Agronomy Journal**, Madison, v. 112, p. 1250–1262, 2020.

COHAN, J. P.; SOUDER, C. L.; GUICHERD, C.; LORGEOU, J.; DU CHEYRON, P.; BONNEFOY, M.; DECARRIER, A.; PIRAUX, F.; LAURENT, F. Combining breeding traits and agronomic indicators to characterize the impact of cultivar on the nitrogen use efficiency of bread wheat. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 242, 107588, 2019.

COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE — CBPTT. **Informações técnicas para trigo e triticale - safra 2016**. Londrina, Embrapa, 2016.

COMPANHIA NACIONAL DO ABASTECIMENTO — CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. Brasília, CONAB, 2020a. Disponível em <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em 12/05/2020

COMPANHIA NACIONAL DO ABASTECIMENTO — CONAB. **Insumos Agropecuários**. Brasília, CONAB; 2020c. Disponível em: <https://consultaweb.conab.gov.br/consultas/consultaInsumo.do?d=6983528-p=2&uf=PR&ano=2020&method=acaoListarConsulta&idSubGrupo=71&btnConsultar=Consultar&jcaptcha=wfn7&idGrupo=27>. Acesso em: 12/05/2020.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO — CONAB. **Trigo – Análise mensal – Junho/2020**. Brasília: Conab, 2020b. 6 p.

DEGASPARI, I. A. M.; SOARES, J. R.; MONTEZANO, Z. F.; DEL GROSSO, S. J.; VITTI, A. C.; ROSSETTO, R. Nitrogen sources and application rates affect emissions of N_2O and NH_3 in sugarcane. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, New York, v. 116, p. 329–344, 2020.

DONALD, C. M.; HAMBLIN, J. The biological yield and harvest index of cereals as agronomic and plant breeding criteria. **Advances in Agronomy**, Amsterdam, v. 28, p. 361–405, 1976.

DU, Y. L.; XI, Y.; CUI, T.; ANTEN, N. P. R.; WEINER, J.; LI, X.; TURNER, N. C.; ZHAO, Y. M.; LI, F. Yield components, reproductive allometry and the tradeoff between grain yield and yield stability in dryland spring wheat. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 257, 107930, 2020.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA — EMBRAPA. **Desenvolvimento de cultivares de feijão-caupi adaptadas às regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste**. Teresina: Embrapa Meio Norte, 2009.

ESPINDULA, M. C.; ROCHA, V. S.; SOUZA, M. A.; GROSSI, J. A. S.; SOUZA, L. T. Doses e formas de aplicação de nitrogênio no desenvolvimento e produção da cultura do trigo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, p. 1404–1411, 2010.

EPISTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Mineral nutrition of plants: Principles and Perspectives**. 2 ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2005. 400 p.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. Experimental designs: um pacote R para análise de experimentos. **Revista da Estatística da Universidade Federal de Ouro Preto**, Ouro Preto, v. 1, n. 1, p. 1–9, 2011.

FOLONI, J. S. S.; BASSOI, M. C.; OLIVEIRA JUNIOR, A.; CASTRO, C. **Fontes e doses de nitrogênio na adubação de semeadura do trigo no Paraná**. Londrina: Embrapa, 2014 (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 8).

FOLONI, J. S. S.; BASSOI, M. C.; SILVA, S. R. **Indicações fitotécnicas para cultivares de trigo da Embrapa no Paraná**. Londrina: Embrapa Soja, 2016. 23 p. (Circular técnica, 117).

GALINDO, F. S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; BUZETTI, S.; RODRIGUES, W. L.; SANTINI, J. M. K.; ALVES, C. J. Nitrogen fertilisation efficiency and wheat grain yield affected by nitrogen doses and sources associated with *Azospirillum brasilense*. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science**, London, v. 69, n. 7, p. 606–617, 2019.

GARCIA, P. L.; SERMARINI, R. A.; TRIVELIN, P. C. O. Placement effect of controlled-release and conventional urea blend in maize. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, London, v. 50, p. 2321 – 2329, 2019.

KANEKO, F. H.; SABUNDJIAN, M. T.; FERREIRA, J. P.; GITTI, D. C.; NASCIMENTO, V.; CARMO, A. L.; VAN CLEEF, E. H. C. B.; BUZETTI, S.; ARF, O. Sources and management of nitrogen before or after irrigation on the winter wheat and bean production. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 36, n. 6, p. 1900–1910, 2020.

KAUR, G.; ZURWELLER, B. A.; NELSON, K. A.; MOTAVALLI, P. P.; DUDENHOEFFER, C. J. Soil Waterlogging and nitrogen fertilizer management effects on corn and soybean yields. **Agronomy Journal**, Madison, v. 109, n. 1, p. 97–106, 2017.

KHAN, A.; AHMAD, A.; ALI, W.; HUSSAIN, S.; ALAYO, B. S.; RAZA, M. A., KAMRAN, M.; TE, X.; AMIN, N.; ALI, S.; IQBAL, N.; KHAN, I.; SATTAR, M. T.; ALI, A.; WU, Y.; YANG, W. Optimization of plant density and nitrogen regimes to mitigate lodging risk in wheat. **Agronomy Journal**, Madison, v. 112, p. 2535 – 2551, 2020.

KHAN, A.; LIU, H. H.; AHMAD, A.; XIANG, L.; ALI, W.; KHAN, A.; KAMRAN, M.; AHMAD, S.; LI, J. C. Impact of nitrogen regimes and planting densities on stem physiology, lignin biosynthesis and grain yield in relation to lodging resistance in winter wheat (*Triticum aestivum* L.). **Cereal Research Communications**, Hungary, v. 43, n. 3, p. 566–579, 2019.

LARA CABEZAS, W. A. R.; KORNDORFER, G. H.; MOTTA, A. S. Volatilização de N-NH₃ na cultura de milho: I. efeito da irrigação e substituição parcial da ureia por sulfato de amônio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 481–487, 1997.

LIU, T.; HUANG, J.; CHAI, K.; CAO, C.; LI, C. Effects of N fertilizer sources and tillage practices on NH₃ volatilization, grain yield, and N use efficiency of rice fields in Central China. **Frontiers in Plant Science**, München, v. 9, p. 385, 2018.

LIU, Y.; LIAO, Y.; LIU, W. High nitrogen application rate and planting density reduce wheat grain yield by reducing filling rate of inferior grain in middle spikelets. **The Crop Journal**, Amsterdam, v. 9, n. 2, p. 412–426, 2021.

LOLLATO, R. P.; JAENISCH, B. R.; SILVA, S. R. Genotype-specific nitrogen uptake dynamics and fertilizer management explain contrasting wheat protein concentration. **Crop Science**, Hoboken, v. 61, p. csc2.20442, 2021.

LORENZO, M.; ASSUERO, S. G.; TOGNETTI, J. A. Low temperature differentially affects tillering in spring and winter wheat in association with changes in plant carbon status. **Annals of Applied Biology**, Hoboken, v. 166, p. 236–248, 2015.

LU, D.; LU, F.; PAN, J.; CUI, Z.; ZOU, C.; CHEN, X.; HE, M.; WANG, Z. The effects of cultivar and nitrogen management on wheat yield and nitrogen use efficiency in the North China Plain. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 171, p. 157–164, 2015.

MA, S.; DUAN, A.; MA, S.; YANG, S. Effect of early-stage regulated deficit irrigation on stem lodging resistance, leaf photosynthesis, root respiration and yield stability of winter wheat under post-anthesis water stress conditions. **Irrigation and Drainage**, Hoboken, v. 65, p. 673–681, 2016.

MALAVOLTA, E.; MORAES, M. F. Fundamentos do nitrogênio e do enxofre na nutrição mineral das plantas cultivadas. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S.; VITTI, G. C. (Org.) **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute (IPNI), 2007. p. 189–250.

MAQBOOL, M. M.; ALI, A.; HAQ, T.; MAJEED, M. N.; LEE, D. J. Response of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) to induced water stress at critical growth stages. **Sarhad Journal of Agriculture**, Pakistan, v. 31, n. 1, p. 53–58, 2015.

MARZI, M.; SHAHBAZI, K.; KHARAZI, N.; REZAEI, M. The influence of organic amendment source on carbon and nitrogen mineralization in different soils. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, New York, v. 20, p. 177–191, 2020.

MONTOYA, M.; VALLEJO, A.; RECIO, J.; GUARDIA, G.; Alvarez, J. M. Zinc–nitrogen interaction effect on wheat biofortification and nutrient use efficiency. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Hoboken, v. 183, n. 2, p. 169–179, 2020.

NITSCHKE, P. R.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. S.; PINTO, L. F. D. **Atlas climático do Estado do Paraná**. Londrina: Instituto Agrônômico do Paraná, 2019.

PERIN, V.; SANTOS, E. A.; LOLLATO, R.; RUIZ-DIAS, D.; KLUITENBERG, G. J. Impacts of ammonia volatilization from broadcast urea on winter wheat production. **Agronomy Journal**, Madison, v. 112, p. 3758–3772, 2020.

PIETRO-SOUZA, W.; BONFIM-SILVA, E. M.; SCHLICHTING, A. F.; Silva, M. C. Desenvolvimento inicial de trigo sob doses de nitrogênio em Latossolo Vermelho de Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 6, p. 575–580, 2013.

PIÑERA-CHAVES, F. J.; BERRY, P. M.; FOULKES, M. J.; JESSON, M. A.; REYNOLDS, M. P. Avoiding lodging in irrigated spring wheat. I. Stem and root structural requirements. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 196, p. 325–336, 2016.

PRADHAN, S.; SEHGAL, V. K.; BANDYOPADHYAY, K. K.; PANIGRAHI, P.; PARIHAR, C. M.; JAT, S. L. Radiation interception, extinction coefficient and use efficiency of wheat crop at various irrigation and nitrogen levels in a semi-arid location. **Indian Journal of Plant Physiology**, New York, v. 23, p. 416–425, 2018.

R CORE TEAM (2020). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Available online at <https://www.R-project.org/>

REETZ, H. F. **Fertilizantes e o seu uso eficiente**. Tradução: Alfredo Scheid Lopes. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA), 2017.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; Oliveira, J. B. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3 ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2013.

SANTOS, W. M.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; PACHECO, E. P.; BARROS, I.; FERNANDES, M. F.; BATISTA, J. N.; BENDER, E. P.; SOUZA, H. N.; JANTALIA, C. P. Ammonia volatilization and yield of corn fertilized with different nitrogen sources in the Brazilian semiarid. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 55, e01036, 2020.

SCHEEREN, P. L.; CASTRO, R. L.; CAIERÃO, E. Botânica, morfologia e descrição fenotípica. In: BORÉM, A.; SCHEEREN, P. L. **Trigo: do plantio à colheita**. Viçosa: Editora UFV, 2015. p. 35-55.

SHIRAZI, S. M.; YUSOP, Z.; ZARDARI, N. H.; ISMAIL, Z. Effect of irrigation regimes and nitrogen levels on the growth and yield of wheat. **Advances in Agriculture**, London, v. 2014, p. 250874, 2014.

SI, Z.; ZAIN, M.; MEHMOOD, F.; WANG, G.; GAO, Y.; DUAN, A. Effects of nitrogen application rate and irrigation regime on growth, yield, and water-nitrogen use efficiency of drip-irrigated winter wheat in the North China Plain. **Agricultural Water Management, Amsterdam**, v. 231, 106002, 2020.

SIBALDELLI, R. N. R.; FARIAS, J. R. B. **Boletim agrometeorológico da Embrapa Soja, Londrina, PR - 2018**. Londrina: Embrapa Soja, 2019.

SIDDIQI, M. Y.; GLASS, A. D. M. Utilization index: A modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, London, v. 4, n. 3, p. 289–302, 1981.

SILVA, S. R.; FOLONI, J. S. S.; BASSOI, M. C.; OLIVEIRA JUNIOR, A.; CASTRO, C. Nitrogênio em cobertura e via foliar em diferentes estádios fenológicos do trigo BRS sabiá. In: REUNIÃO DA COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE, 10., 2016, Londrina. **Anais [...]** Londrina: Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale, 2016.

SWIADER, J. M.; CHYAN, Y.; FREIJI, F. G. Genotypic differences in nitrate uptake and utilization efficiency in pumpkin hybrids. *Journal of Plant Nutrition*, London, v. 17, n. 10, p. 1687 – 1699, 1994.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858 p.

TASCA, F. A.; ERNANI, P. R.; ROGERI, D. A.; GATIBONI, L. C.; CASSOL, P. C. Volatilização de amônia no solo após aplicação de ureia convencional ou com inibidor de urease. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 493–502, 2011.

TEI, F.; DE NEVE, S.; HAAN, J.; KRISTENSEN, H. L. Nitrogen management of vegetable crops. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 240, 106316, 2020.

TEIXEIRA-FILHO, M. C. M.; BUZETTI, S.; ALVAREZ, R. C. F.; FREITAS, J. G.; ARF, O.; SÁ, M. E. Resposta de cultivares de trigo irrigados por aspersão ao nitrogênio em cobertura na região do Cerrado. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 29, n. 3, p. 421-425, 2007.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Centerton: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1955. 104 p.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy**. 12. ed. Washington: USDA-Natural Resources Conservation Service, 2014. 360 p.

VIERO, F.; BAYER, F.; FONTOURA, S. M. V.; MORAES, R. P. Ammonia volatilization from nitrogen fertilizers in no-till wheat and maize in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 1515–1525, 2014.

VIOLA, R.; BENIN, G.; CASSOL, L. C.; PINNOW, C.; FLORES, M. F.; BORNHOFEN, E. Adubação verde e nitrogenada na cultura do trigo em plantio direto. **Bragantia**, Campinas, v. 72, p. 90 – 100, 2013.

WIETHÖLTER, S. Fertilidade do solo e a cultura do trigo no Brasil. In: PIRES, J. L. F.; VARGAS, L.; CUNHA, G. R. **Trigo no Brasil: bases para produção competitiva e sustentável**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2011. p. 135–185.

WU, W.; MA, B. L.; FAN, J. J.; SUN, M.; YI, Y.; GUO, W. S.; VOLDENG, H. D. Management of nitrogen fertilization to balance reducing lodging risk and increasing yield and protein content in spring wheat. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 241, 107584, 2019.

YAN, S.; WU, Y.; FAN, J.; ZHANG, F.; QIANG, S.; ZHENG, J.; XIANG, Y.; GUO, J.; ZOU, H. Effects of water and fertilizer management on grain filling characteristics, grain weight and productivity of drip-fertigated winter wheat. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 213, p. 983–995, 2019.

YANG, D.; CAI, T.; LUO, Y.; WANG, Z. Optimizing plant density and nitrogen application to manipulate tiller growth and increase grain yield and nitrogen-use efficiency in winter wheat. **PeerJ**, London, v. 7, e6484, 2019.

YOUSAF, M.; SHAABAN, M.; ALI, S. A. I.; FAHAD, S.; KHAN, M. J.; WANG, Y.; SHAH, A. N.; SABIEL, S. A. I.; OSMAN, K. A. The effect of nitrogen application rates and timings of first irrigation on wheat growth and yield. **International Journal of Agriculture Innovations and Research**, Bhopal, v. 2, n. 4, p. 2319–1473, 2014.

ZADOKS, J. C.; CHANG, T. T.; KONZAK, C. F. A. A decimal code for the growth stages of cereals. **Weed Research**, Hoboken, v. 14, p. 415–421, 1974.

ZAGONEL, J.; Fernandes, E. C. Doses e épocas de aplicação de redutor de crescimento afetando cultivares de trigo em duas doses de nitrogênio. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 25, n. 2, p. 331–339, 2007.

ZHANG, L.; HE, X.; LIANG, Z.; ZHANG, W.; ZOU, C.; CHEN, X. Tiller development affected by nitrogen fertilization in a high-yielding wheat production system. **Crop Science**, Hoboken, v. 60, n. 2, p. 1–14, 2020.

ZHANG, M.; WANG, H.; YI, Y.; DING, J.; ZHU, M.; LI, C.; GUO, W.; FENG, C.; ZHU, X. Effect of nitrogen levels and nitrogen ratios on lodging resistance and yield potential of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). **PLoS One**, San Francisco, v. 12, n. 11, e0187543, 2017.

ZHENG, W.; LIU, Z.; ZHANG, M.; SHI, Y.; ZHU, Q.; SUN, Y.; ZHOU, H.; LI, C.; YANG, Y.; GENG, J. Improving crop yields, nitrogen use efficiencies, and profits by using mixtures of coated controlled-released and uncoated urea in a wheat-maize system. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 205, p. 106–115, 2017.

ZUBAIROVA, U.; NIKOLAEV, S.; PENENKO, A. PODKOLODNYI, N.; GOLUSHKO, S.; AFONNIKOV, D.; KOLCHANOV, N. Mechanical behavior of cells within a cell-based model of wheat leaf growth. **Frontiers in Plant Science**, München, v. 7, p. 1878–1893, 2016.

4. CAPÍTULO B – EFICIÊNCIA DE UTILIZAÇÃO DE NITROGÊNIO E RENDIMENTO DE GRÃOS DE TRIGO AFETADOS PELA UREIA TRATADA COM NBPT E PELAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS

RESUMO

A ureia é o principal fertilizante nitrogenado utilizado na cultura do trigo, porém ela é muito susceptível a perdas de nitrogênio (N) por volatilização de amônia (NH₃). Por outro lado, há aditivos químicos capazes de reduzir esta volatilização, como o inibidor de urease N-(n-butil) tiofosfórico triamida (NBPT). O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência de utilização de N (EUN) e o rendimento de grãos de trigo em resposta à adubação nitrogenada com doses ureia tratada com diferentes doses de NBPT, considerando épocas da adubação e a influência de três condições ambientais. O experimento foi realizado em situação de campo em duas localidades no estado Paraná (Londrina e Ponta Grossa). Em Londrina, foram utilizadas condições de irrigação (L_{irrig}) e de sequeiro (L_{seq}), enquanto em Ponta Grossa o trigo foi cultivado apenas em sequeiro (PG_{seq}). Os ensaios de campo foram conduzidos em delineamento em blocos casualizados em arranjo fatorial (2 × 4 × 2) + 1, composto por duas doses de N (40 e 80 kg ha⁻¹), ureia tratada com quatro doses de NBPT (0, 250, 500 e 2000 mg kg⁻¹), duas épocas para realização da adubação nitrogenada (durante a semeadura da lavoura ou no início do perfilhamento das plantas), e um tratamento adicional com ausência de adubação nitrogenada (testemunha). Avaliou-se as características agronômicas: rendimento de grãos, peso hectolítrico, peso de mil grãos, altura e acamamento de plantas, índice de colheita aparente (ICA), densidade de plantas férteis, matéria seca da parte aérea (MSPA), teor e conteúdo de N na MSPA, e eficiências de utilização de N para rendimento de grãos (EUN_{RG}) e para produção de MSPA (EUN_{MSPA}). As condições ambientais determinaram a eficácia da fertilização nitrogenada e do NBPT, influenciando a EUN e o rendimento de grãos. O NBPT não influenciou o rendimento de grãos em ambientes com solos ácidos e maior disponibilidade hídrica. A fertilização nitrogenada realizada exclusivamente na semeadura foi suficiente para suprir a necessidade de N do trigo. Concluímos que a fertilização com N e o manejo do NBPT devem considerar as características ambientais (como pH, temperatura e umidade do solo) durante a estação de crescimento do trigo.

Palavras-chave: *Triticum aestivum* (L.); Volatilização de amônia; N-(n-butil) tiofosfórico triamida; Eficiência de utilização de nitrogênio.

ABSTRACT: Nitrogen utilization efficiency and grain yield of wheat crop affected by urea treated with NBPT and environmental conditions

Urea is the main nitrogen (N) fertilizer used in wheat crop, but it is quite susceptible to N losses due to ammonia (NH_3) volatilization. On the other hand, there are chemical additives capable of reducing this volatilization, such as the N-(n-butyl) thiophosphoric triamide (NBPT) urease inhibitor. The objective of this work was to evaluate N utilization efficiency (NUE) and grain yield of wheat in response to N fertilization with rates of urea treated with different rates of NBPT, considering fertilization timings and the influence of three environmental conditions. The experiment was carried out in a field situation in two locations in the State of Paraná (Londrina and Ponta Grossa). In Londrina, irrigation (L_{irrig}) and rainfed (L_{rainfed}) conditions were used, while in Ponta Grossa wheat was grown only in rainfed (PG_{rainfed}). The trials were carried out in a randomized block design in a factorial arrangement $(2 \times 4 \times 2) + 1$, consisting of two rates of N (40 and 80 kg ha⁻¹), urea treated with four rates of NBPT (0, 250, 500, and 2000 mg kg⁻¹), two timings for N fertilization (during crop sowing or at the beginning of plant tillering), and an additional treatment with no N fertilization (control). Agronomic characteristics evaluated: grain yield, hectolitic weight, thousand grain weight, plant height and lodging, apparent harvest index (AHI), density of fertile plants, shoot dry matter (SDM), N concentration and content in SDM, and N utilization efficiency for grain yield (NUE_{GY}) and for SDM production (NUE_{SDM}). Environmental conditions set the effectiveness of N fertilization and NBPT, influencing NUE and grain yield. NBPT did not influence grain yield in environments with acidic soils and high water availability. Nitrogen fertilization carried out exclusively at sowing was enough to supply wheat N requirement. We conclude that N fertilization and NBPT management should consider environmental features (such as soil pH, temperature and humidity) during the wheat-growing season.

Keywords: *Triticum aestivum* (L.); Ammonia volatilization; N-(n-butyl) thiophosphoric triamide; Nitrogen utilization efficiency.

4.1. INTRODUÇÃO

O trigo (*Triticum aestivum* L.) é utilizado em ampla escala geográfica como um dos principais cereais cultivados para alimentação humana e animal (SCHEEREN et al., 2015). O Brasil semeou na safra de 2020 mais de dois milhões de hectares com esta cultura (CONAB, 2020a), no entanto, o país não tem sido autossuficiente na produção de trigo, que o leva a importar mais da metade de sua demanda para suprir seu consumo interno (CONAB, 2020b). Isto se deve principalmente à relativa baixa produtividade da cultura no Brasil (média aproximada de 2.500 kg ha⁻¹), que o torna menos competitivo a nível internacional. Portanto, é preciso inovar, utilizando novas tecnologias capazes de expandir a produtividade e a produção de trigo brasileiro.

O nitrogênio (N) é o nutriente mais limitante da produtividade do trigo (SALA et al., 2005). Isto se deve ao papel fundamental do N na fisiologia vegetal, atuando como constituinte de paredes celulares, proteínas, ácidos nucléicos, enzimas, coenzimas, fitocromos e molécula de clorofila (TAIZ et al., 2017). Deste modo, a deficiência de N resulta em folhas menores, redução da taxa fotossintética, baixo perfilhamento das plantas e, conseqüentemente, menor rendimento de grãos, que usualmente apresentam menor teor de proteínas (LOLLATO et al., 2021). Por outro lado, Benett et al. (2011) verificaram que o aumento da concentração de N nas folhas de plantas de trigo proporcionou incrementos de rendimento de grãos devido a aumentos de número de grãos por espigeta, grãos por espiga e massa de grãos por espiga. Neste contexto, Siddiqi e Glass (1981) propuseram um índice eficiência de utilização (EU) de nutriente pelas plantas em função da concentração deste nutriente na massa seca. Eles relatam que o crescimento da planta está relacionado à concentração do nutriente na biomassa, pois o crescimento só ocorre a partir de uma concentração mínima do nutriente no tecido vegetal. Assim, a EU de N (EUN) pela planta pode ser utilizada indiretamente para avaliar a eficiência da adubação nitrogenada.

A maior EU está geralmente associada com a obtenção de maior produtividade a partir do fornecimento de mínima quantidade de nutriente, devido à alta eficiência das plantas em absorver e utilizar o nutriente mineral (SIDDIQI e GLASS, 1981). Ela pode ser estimada com base no rendimento de grãos (COHAN et al., 2019) ou na biomassa produzida pela parte aérea da planta (BHATTACHARYYA et al., 2019).

O uso de fertilizantes nitrogenados em culturas não-leguminosas contribui significativamente para aumentar o custo agrícola (SALA et al., 2005). Por exemplo, na safra de 2019/2020 o gasto total com fertilizantes correspondeu a 18,4% do custo total de produção da cultura de trigo no estado do Paraná (SEAB, 2020), sendo que o N foi responsável por aproximadamente metade deste valor.

A ureia [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$] é o fertilizante nitrogenado mais utilizado na agricultura brasileira (TEIXEIRA FILHO et al., 2010). Ela se destaca como fonte de N devido ao fato de sua produção a partir de amônia (NH_3) e gás carbônico (CO_2) tornar o produto menos oneroso do que os demais fertilizantes nitrogenados. Além disso, a ureia apresenta alta concentração de N (45%), que reduz custos com transporte e armazenamento, tornando o custo por unidade de N mais vantajoso para o agricultor (FRANCO e SARAIVA NETTO, 2007; FRAZÃO et al., 2014). A ureia é altamente solúvel em água e, após sofrer transformações químicas, libera rapidamente o N no solo, principalmente na forma de amônio (NH_4^+), que é um cátion prontamente disponível para ser absorvido pelas plantas ou ser perdido por lixiviação, além de ser altamente susceptível a perdas gasosas pelo processo de volatilização, a partir da reação da ureia com enzimas presentes no solo (CANTARELLA e MARCELINO, 2008).

A urease (ureia amido-hidrolase) é a enzima que catalisa a hidrólise da ureia, e sua produção é realizada pelas plantas, microrganismos e alguns membros da fauna do solo (KANDELER e GERBER, 1988). A hidrólise da ureia resulta na formação de carbonato de amônio [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow (\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$], que é rapidamente decomposto em NH_4^+ , bicarbonato (HCO_3^-) e hidroxila (OH^-) [$(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{NH}_4^+ + \text{HCO}_3^- + \text{OH}^-$]. A seguir, o NH_4^+ pode ser convertido em NH_3 [$\text{NH}_4^+ + \text{OH}^- \rightarrow \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$] que é perdido por volatilização (TASCA et al., 2011).

A atividade da urease está relacionada à biomassa microbiana responsável pela ciclagem de nutrientes no solo. Ela é influenciada pelas condições ambientais, como temperatura e umidade do solo (LONGO e MELO, 2005), e pelo manejo do solo e da cultura agrícola, sendo mais intensa em solos que recebem frequentemente fertilizantes nitrogenados (LANNA et al., 2010).

Sistemas agrícolas com rotação de culturas por longo período associada à prática do plantio direto na palha apresentam maior quantidade e diversidade de microrganismos e, portanto, maior atividade da urease do que sistemas com sucessão de culturas e cultivo convencional com preparo mecanizado do solo (ALHAMEID et al., 2019). Quando a ureia é aplicada na superfície do solo, as perdas de N por volatilização de NH_3 podem ser até 47% maiores em sistema plantio direto do que em cultivo convencional (LARA CABEZAS et al.,

1997). Além disso, solos cultivados anteriormente com gramíneas geralmente apresentam maior atividade de urease do que aqueles cultivados com leguminosas (LANNA et al., 2010), provavelmente devido à maior relação C/N dos resíduos vegetais promover maior diversidade de microrganismos e atividade de enzimas.

Devido à elevada suscetibilidade da ureia a perdas por volatilização de NH_3 , principalmente em países de clima tropical como o Brasil (FRAZÃO et al., 2014), novas tecnologias têm sido desenvolvidas para aumentar sua eficiência, tais como a incorporação e/ou revestimento da ureia com micronutrientes ou polímeros que interferem na sua hidrólise e solubilização, além da adição de fertilizantes ácidos em formulados NPK. Neste contexto, o tratamento de ureia com inibidores de urease [principalmente o N-(n-butil) tiofosfórico triamida – NBPT] consiste na principal estratégia utilizada para diminuir ou retardar o processo de volatilização de NH_3 (OLIVEIRA et al., 2014).

O NBPT é aplicado revestindo os grânulos de ureia, e sua eficiência na diminuição da atividade da urease está relacionada à sua concentração e à uniformidade de sua distribuição ao redor dos grânulos do fertilizante (ABALOS et al., 2012). Por meio de uma meta-análise sobre o uso de NBPT na agricultura, Silva et al. (2017) concluíram que a utilização do inibidor no tratamento da ureia produziu uma redução média de 52% das perdas de N por volatilização e um aumento médio de 5,3% do rendimento das principais culturas agrícolas em diferentes condições ambientais de clima e solo.

O mecanismo de ação do NBPT objetiva ocupar os mesmos sítios de atuação da enzima urease, promovendo a redução da hidrólise da ureia e/ou o retardamento do pico de volatilização (TASCA et al., 2011; SILVA et al., 2017; LANA et al., 2018). Este retardo pode ser suficiente para diminuir significativamente as perdas de N por volatilização até que a ureia seja incorporada ao solo pela chuva ou pela irrigação (ESPINDULA et al., 2010). Entretanto, a atividade de inibição do NBPT sobre a enzima urease é influenciada pelo período de tempo de sua exposição às condições ambientais (BARBERENA et al., 2019), e essa atividade é reduzida à medida que o inibidor se degrada, liberando sítios para ligação direta da urease na ureia (RAWLUK et al., 2001).

A despeito da existência de inúmeros trabalhos sobre a utilização de NBPT em culturas agrícolas (que geralmente apresentam resultados variáveis), raros são os experimentos conduzidos com a cultura do trigo em condições subtropicais, especialmente incluindo a avaliação da influência de variáveis ambientais e/ou meteorológicas sobre a eficiência da adubação nitrogenada. Nós hipotetizamos que as condições ambientais são determinantes da ação da urease, da efetividade e degradação do NBPT, e da liberação de N

da ureia para as plantas, influenciando fortemente sua EUN e, conseqüentemente, a produtividade vegetal. Deste modo, o objetivo deste trabalho foi avaliar a EUN e o rendimento de grãos da cultura de trigo em resposta à adubação nitrogenada com doses de ureia tratada com diferentes doses de NBPT, considerando diferentes épocas de adubação e a influência de três condições ambientais.

4.2. MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1. Caracterização dos locais e das condições ambientais

Os ensaios de campo foram conduzidos na safra de 2016 em duas localidades no estado Paraná: Londrina (23°11'37" S, 51°11'03" W; altitude de 628 m) e Ponta Grossa (25°08'59" S, 50°04'39" W; altitude de 876 m). Em Londrina, foram utilizadas condições de sequeiro (L_{seq}) e de irrigação (L_{irrig}), enquanto em Ponta Grossa o trigo foi cultivado apenas em sequeiro (PG_{seq}). Portanto, consideramos um total de três ambientes. Os ensaios L_{irrig} e L_{seq} foram dispostos lado a lado, separados por uma distância de 10 m.

As condições meteorológicas (precipitação pluviométrica, umidade relativa e temperatura média do ar), durante a estação de crescimento do trigo nos dois locais, foram registradas em estações meteorológicas localizadas a 500 e 800 m distância dos experimentos, em Londrina e Ponta Grossa, respectivamente. Estas informações foram utilizadas no ambiente irrigado de Londrina para indicar os momentos de suplementação hídrica por meio de um sistema de irrigação autopropelido por aspersão.

Em Londrina o relevo é suavemente ondulado e o solo da área experimental possui textura argilosa (732 g kg⁻¹ de argila), sendo classificado, de acordo com o USDA Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 2014), como Rhodic Eutrudox (Latossolo Vermelho eutroférico, no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos; SANTOS et al., 2013). O solo apresentava as seguintes características químicas na camada superficial (0–20 cm): pH em CaCl₂ (0,01 mol L⁻¹) de 5,4; 4,59 cmol_c dm⁻³ de acidez potencial (H+Al); 15,5 g dm⁻³ de carbono orgânico total; 37,1 mg dm⁻³ de P disponível (Mehlich-1); 207 mg dm⁻³ de K trocável; 4,30 cmol_c dm⁻³ de Ca²⁺ trocável; 2,24 cmol_c dm⁻³ de Mg²⁺ trocável; saturação por bases (V) de 60,5%; 0,01 cmol_c dm⁻³ de Al³⁺ trocável; e capacidade de troca catiônica (CTC) de 11,65 cmol_c dm⁻³. O clima regional, de acordo com a classificação de Köppen, é subtropical úmido (Cfa), com verão quente e chuvoso, com temperatura e precipitação médias

anuais de 21,2 °C e 1438 mm, respectivamente; geadas pouco frequentes e sem estação seca definida (SIBALDELLI e FARIAS, 2019).

Em Ponta Grossa o relevo é suavemente ondulado e o solo da área experimental possui textura média (526 g kg⁻¹ de argila), sendo classificado como Rhodic Hapludox (SOIL SURVEY STAFF, 2014) ou Latossolo Vermelho distroférico (SANTOS et al., 2013), apresentando as seguintes características química na camada superficial (0–20 cm): pH em CaCl₂ (0,01 mol L⁻¹) de 4,7; 5,65 cmol_c dm⁻³ de acidez potencial (H+Al); 23,4 g dm⁻³ de carbono orgânico total; 7,9 mg dm⁻³ de P disponível (Mehlich⁻¹); 127 mg dm⁻³ de K trocável; 2,94 cmol_c dm⁻³ de Ca²⁺ trocável; 1,06 cmol_c dm⁻³ de Mg²⁺ trocável; V de 43,5%; 0,11 cmol_c dm⁻³ de Al³⁺ trocável; e CTC de 9,97 cmol_c dm⁻³. O clima regional é subtropical úmido (Cfb) mesotérmico, com temperatura média anual de 17,5 °C e precipitação média anual de 1500 mm, com chuvas bem distribuídas e geadas frequentes (NITSCHKE et al., 2019).

Previamente à semeadura do experimento, foi realizada uma estimativa da quantidade de palhada de soja nas áreas experimentais, por meio da amostragem de quatro sub-áreas de 0,5 × 0,5 m (0,25 m²), definidas ao acaso por meio do lançamento de um gabarito. As amostras de palhada foram colocadas em estufa com circulação forçada de ar a 65 °C por 72 horas para secagem. Após pesagem da matéria seca e sua divisão pela área amostrada, obteve-se 4.550 e 5.870 kg ha⁻¹ de palhada de soja presente nas áreas experimentais de Londrina e Ponta Grossa, respectivamente.

4.2.2. Delineamento experimental e descrição dos tratamentos

O experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizados, com três repetições, em arranjo fatorial (2 × 4 × 2) + 1, considerando duas doses de N (40 e 80 kg ha⁻¹), ureia tratada com quatro doses de NBPT (0, 250, 500 e 2000 mg kg⁻¹) e duas épocas de adubação nitrogenada (durante a semeadura da lavoura ou no início do perfilhamento das plantas), além de um tratamento adicional sem adição de N (testemunha), totalizando 51 unidades experimentais em cada ambiente. As doses de N foram baseadas nas indicações técnicas para a cultura de trigo do Paraná (FOLONI et al., 2016).

No processo de tratamento da ureia (45% de N) com o inibidor de urease NBPT foi utilizado o aditivo líquido Agrotain® (fabricado por AGROTAIN International, L.L.C – Saint Louis, Missouri, EUA), com densidade de 1,06 kg L⁻¹, contendo 0,2 kg kg⁻¹ do ingrediente ativo NBPT, especialmente desenvolvido para tratamento de ureia. Deste modo, para obtenção das doses de 250, 500 e 2000 mg kg⁻¹ (NBPT/ureia) foram misturados 1,1792,

2,3585 e 9,434 mL de Agrotain® por kg de ureia, respectivamente. Exemplo de cálculo para a dose de 250 mg kg⁻¹: Volume de aditivo líquido = $(250/1,06/0,2/1000) = 1,1792$ mL Agrotain® por kg de ureia.

A mistura do Agrotain® com a ureia, segundo as doses, foi realizada em misturador de fertilizantes do tipo rotatório, de modo a dispersar a ureia em seu recipiente interno e permitir seu contato uniforme com o aditivo. O término do processo foi definido com base na completa homogeneização da mistura, que é identificada por meio da coloração verde uniforme recobrando a superfície das partículas de ureia, devido ao corante verde atóxico presente no produto comercial.

Cada parcela experimental foi composta por nove linhas de semeadura com 6 m de comprimento, espaçadas 0,178 m entre si, totalizando 9,6 m². Para avaliação dos tratamentos foi desprezada uma linha de cada lateral, considerando como área útil da parcela as sete linhas centrais de semeadura com um total de 7,5 m². O trigo foi semeado sobre palhada de soja, em sistema plantio direto, em sulcos com aproximadamente 4 cm de profundidade, com densidade de semeadura de 350 sementes viáveis m⁻². Os tratamentos específicos com adubação nitrogenada no dia da semeadura foram aplicados no sulco anteriormente à semeadura, em uma primeira passada do implemento agrícola. A adubação de base também foi realizada no sulco, no momento da semeadura do trigo, com dose de 300 kg ha⁻¹ do formulado 00-20-20 (N-P₂O₅-K₂O), para o adequado fornecimento de fósforo e potássio às plantas, de acordo com premissas da Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale (CBPTT, 2016). Os tratamentos com adubação nitrogenada em cobertura foram aplicados no início do perfilhamento da cultura (estádio fenológico GS21 da escala de Zadoks et al., 1974). O manejo fitossanitário e demais tratos culturais foram baseados nas indicações da CBPTT (2016).

A cultivar de trigo foi a BRS Gralha-Azul, que apresenta ciclo de desenvolvimento (emergência de plântulas até maturidade fisiológica de sementes) médio de 110 dias e altura média de 90 cm (BASSOI e FOLONI, 2015). Ela é amplamente cultivada nos estados do Paraná e Santa Catarina, apresentando alta produtividade, mas sendo suscetível ao acamamento de plantas, principalmente quando se utilizam altas doses de N em condições de alta disponibilidade hídrica.

4.2.3. Avaliações agronômicas e índices de eficiência de utilização de nitrogênio

No estágio fenológico de pleno florescimento (GS69 da escala de Zadoks), plantas de trigo (exceto raízes) foram colhidas em duas linhas de lavoura com 0,5 m de extensão (0,18 m²) na parte central de cada parcela experimental. A seguir a biomassa verde foi acondicionada em saco de papel e colocada em estufa com circulação forçada de ar a 65 °C por 72 horas para secagem, para posterior pesagem em balança de precisão e cálculo do valor de matéria seca da parte aérea (MSPA, kg ha⁻¹). As amostras de tecido vegetal foram moídas em moinho tipo Wiley de aço inoxidável, passadas em peneira de 0,1 mm, para subsequente determinação de N pelo método de Kjeldahl. Para avaliação do N absorvido pelas plantas, o conteúdo de N acumulado na MSPA das plantas foi estimado a partir da quantidade de MSPA e do teor de N neste tecido vegetal [N acumulado na MSPA (kg ha⁻¹) = MSPA (kg ha⁻¹) × teor (g kg⁻¹) / 1000]. O florescimento pleno foi escolhido para esta avaliação devido ser o estágio fenológico com maior conteúdo de N absorvido pela biomassa vegetativa da planta (WIETHÖLTER, 2011), apresentando, portanto, maior contribuição para a formação e rendimento de grãos.

A eficiência de utilização de N (EUN) da lavoura de trigo para produção de MSPA no estágio de crescimento GS69 foi estimada por meio do cálculo proposto por Siddiqi e Glass (1981), tendo como base a área de um hectare (considerando MSPA em kg ha⁻¹, e o N acumulado na MSPA em g ha⁻¹), de acordo com a seguinte equação (1):

$$EUN \text{ para MSPA } (kg^2 g^{-1} ha^{-1}) = \frac{(MSPA)^2}{N \text{ acumulado na MSPA}} \quad (1)$$

Para determinar o rendimento de grãos (RG; kg ha⁻¹) na maturidade fisiológica, foi realizada a colheita (sete linhas centrais × 6 m de comprimento) com colhedora automotriz desenvolvida para experimentação agronômica (Wintersteiger®), registrando-se a massa de grãos após ajuste da umidade para 13%. Nesses grãos colhidos também foram avaliados o peso hectolítico e o peso de mil de grãos.

O índice de colheita aparente (ICA), adaptado de Donald e Hamblin (1976), porém, considerando a MSPA no GS69 (devido à sua alta correção com o rendimento de grãos de trigo, como reportado por CHEN et al., 2019) foi calculado por meio da Equação 2, utilizando como base a área de um hectare (RG e MSPA em kg ha⁻¹):

$$ICA (kg kg^{-1}) = \frac{RG}{(RG + MSPA)} \quad (2)$$

Por sua vez, a EUN da lavoura de trigo para RG foi estimada considerando o N acumulado na MSPA (em kg ha⁻¹) no GS69 e o RG (em kg ha⁻¹) na maturidade fisiológica (GS92) (Equação 3):

$$EUN \text{ para RG (kg kg}^{-1}\text{)} = \frac{RG}{N \text{ acumulado na MSPA}} \quad (3)$$

Também foram avaliados no estágio GS69 a altura (média de cinco plantas por parcela) e a população final de plantas férteis (determinada através da contagem do número total de espigas em duas linhas de plantas com 0,5 m de extensão, dividido pela respectiva área amostrada, expressando o resultado em espigas m⁻²). Finalmente, no dia anterior à colheita de grãos foi avaliado o acamamento de plantas (método visual; EMBRAPA, 2009).

4.2.4. Análises estatísticas

As análises estatísticas foram realizadas por meio do software R (R CORE TEAM, 2020), utilizando o pacote ExpDes.pt (FERREIRA et al., 2011). Os dados foram submetidos ao teste de normalidade de resíduos de Shapiro-Wilk e ao teste de homogeneidade de variâncias de Bartlett. Atendidas as pressuposições, foi aplicada a análise de variância a 5% de significância. As médias dos fatores 'doses de N' ou 'épocas de adubação nitrogenada' foram comparadas pelo teste de Student-Newman-Keuls (a 5% de significância). As médias do fator 'doses do inibidor de urease NBPT' (0, 250, 500 e 2000 mg kg⁻¹) foram submetidas à análise de regressão por meio do software SAEG® (EUCLYDES, 1997), para ajuste dos modelos linear, quadrático e quadrático base raiz quadrada que melhor se ajustam biologicamente aos resultados experimentais. Para escolha dos modelos, os coeficientes das equações foram testados pelo teste F a 0,1, 1 e 5% de significância. Finalmente, para dois ou mais modelos com coeficientes significativos, a seleção foi feita com base no maior coeficiente de determinação (R²).

4.3. RESULTADOS

4.3.1. Condições meteorológicas durante o ciclo e adubações da lavoura de trigo

O experimento de campo foi conduzido na safra de 2016 em Londrina em condições de sequeiro (L_{seq}) e de irrigação (L_{irrig}), e em Ponta Grossa somente em sequeiro (PG_{seq}), resultando em três ambientes determinados pelas condições meteorológicas e pelo fornecimento adicional de água (Figura 1).

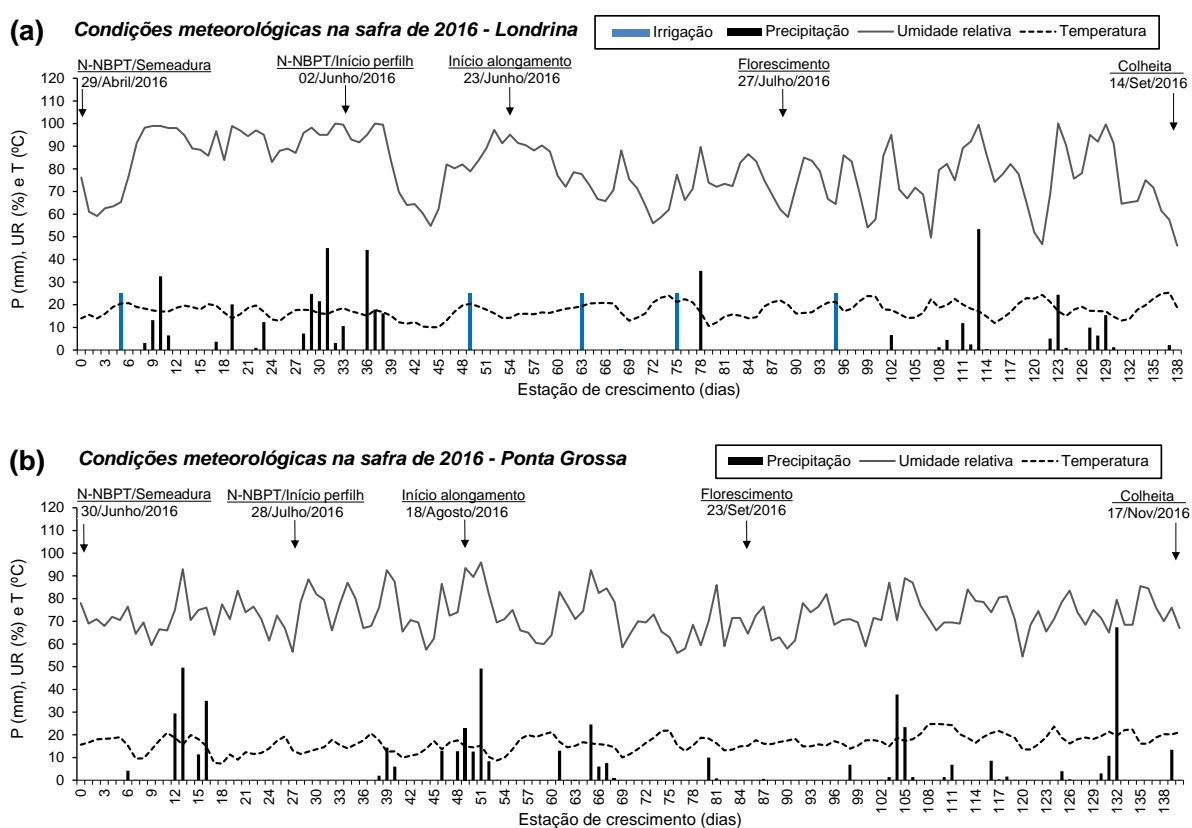


Figura 1. Irrigação e precipitação (P), umidade relativa do ar (UR) e temperatura (T) média na estação de crescimento do trigo em 2016 em Londrina [29/04 a 14/09/2016 = 139 dias (a)] e Ponta Grossa [30/06 a 17/11/2016 = 141 dias (b)]. Barras verticais na cor azul (a) indicam irrigações de 25 mm, realizadas em 04/05, 17/06, 01/07, 13/07 e 02/08/2016, apenas no experimento irrigado de Londrina.

A safra de trigo em Londrina teve um ciclo total (semeadura até colheita) de 139 dias com temperatura média de 17 °C, umidade relativa do ar com média de 79% e precipitação total de 465,3 mm (Figura 1a). Além disso, o ensaio com suplementação hídrica (L_{irrig}) recebeu cinco irrigações de 25 mm (aos 5°, 49°, 63°, 75° e 95° dias do ciclo), elevando o

fornecimento total de água a 590,3 mm e reduzindo o déficit hídrico acumulado de 31,4 para 4,3 mm (dados não apresentados). Após a semeadura e adubação de base da lavoura houve um período de oito dias sem chuvas (nota: em L_{irrig} houve uma irrigação no 5º dia), seguido por 55,4 mm de precipitação em 4 dias. Além disso, houve dois períodos significativos de estiagem, o primeiro com duração de 39 dias (39º ao 77º dia da estação de crescimento sem chuvas) e o segundo com 32 dias (79º ao 110º com um acumulado de 37,4 mm). A adubação de cobertura foi realizada no 34º dia no início do perfilhamento (GS21), sendo precedido por 112,4 mm de chuvas (em 6 dias consecutivos) e recebeu outros 78,3 mm nos quatro dias subsequentes. A fase de perfilhamento da lavoura (GS21–GS29) durou aproximadamente 21 dias (34º ao 54º dia do ciclo), com temperatura média de 15,1 °C e fornecimento de água (chuva e/ou irrigação) de 78,4 ou 103,4 mm em L_{seq} e L_{irrig} , respectivamente.

O experimento de Ponta Grossa (PG_{seq}) teve um ciclo de 141 dias, com temperatura média de 16,4 °C, umidade relativa do ar média de 73% e um total de 526,4 mm de precipitação (Figura 1b). A distribuição das chuvas foi relativamente regular, resultando em um déficit hídrico acumulado de apenas 5,6 mm. A semeadura e a adubação de base da lavoura foram seguidas por um período de estiagem de 12 dias (com apenas 4,2 mm de chuva no 6º dia). A seguir houve 125,4 mm de precipitação em 5 dias consecutivos. A fase de perfilhamento com duração de 21 dias (28º ao 48º dia) apresentou temperatura média de 14,7 °C e recebeu 73 mm de chuva. A adubação de cobertura foi realizada no 28º dia do ciclo (GS21), sendo intercalada por dois períodos de 11 dias de estiagem (0 mm antes e 2,2 mm depois da adubação). Além disso, houve dois períodos de menor quantidade de chuvas, ou seja, 69º ao 103º dia (19,8 mm) e 106º ao 129º dia (24,8 mm). Neste contexto, o florescimento aconteceu no 85º dia, ou seja, ele ocorreu em meio a períodos de baixa precipitação.

4.3.2. Características agronômicas e rendimento de grãos da cultura de trigo

A densidade de plantas férteis (DPF) teve médias de 391, 452 e 512 espigas m^{-2} em L_{seq} , L_{irrig} e PG_{seq} , respectivamente; sendo 'média' = [(fatorial \times 8) + adicional]/9 (Tabela 1). A adição de N aumentou a DPF em média de 20,2% em L_{seq} em comparação com o tratamento adicional (testemunha) sem adubação nitrogenada. Em PG_{seq} , o aumento da dose de N de 40 para 80 $kg\ ha^{-1}$ elevou a DPF em 10,4% (Tabela 1); e o aumento da dose de NBPT incorporado à ureia resultou em decréscimo linear da DPF de até 13% (Figura 2a).

Tabela 1. Significância da análise de variância dos efeitos principais [dose de nitrogênio (DN), dose de inibidor (DI) de urease NBPT, e época de adubação (E)] e de suas interações; e médias de densidade de plantas férteis (DPF), rendimento de grãos, peso hectolítrico e peso de mil grãos da cultivar de trigo BRS Gralha-Azul, cultivada em três ambientes [Londrina-irrigado (L_{irrig}), Londrina-sequeiro (L_{seq}) e Ponta Grossa-sequeiro (PG_{seq})], com duas doses de N, na forma de ureia tratada com quatro doses de NBPT, considerando duas épocas de adubação.

Fonte de variação	GL ⁽³⁾	DPF			Rendimento de grãos			Peso hectolítrico			Peso de mil grãos		
		L _{seq}	L _{irrig}	PG _{seq}	L _{seq}	L _{irrig}	PG _{seq}	L _{seq}	L _{irrig}	PG _{seq}	L _{seq}	L _{irrig}	PG _{seq}
Bloco	2	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	**	ns	ns
Dose de nitrogênio (DN)	1	**	ns	**	*	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Dose de inibidor (DI)	3	ns	ns	*	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Época de adubação (E)	1	ns	ns	ns	ns	ns	***	ns	ns	ns	ns	***	**
DN x DI	3	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
DN x E	1	ns	ns	ns	ns	ns	***	ns	*	ns	ns	ns	ns
DI x E	3	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
DN x DI x E	3	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Adicional vs Fatorial ⁽¹⁾	1	**	ns	ns	***	*	**	ns	ns	ns	ns	*	ns
CV (%) ⁽²⁾		8,9	10,0	12,9	8,8	8,4	6,5	4,5	1,1	5,2	3,6	3,2	2,8

Fator	Tratamento	DPF (espigas m ⁻²)			Rendimento de grãos (kg ha ⁻¹)			Peso hectolítrico (kg hL ⁻¹)			Peso de mil grãos (g)		
		L _{seq}	L _{irrig}	PG _{seq}	L _{seq}	L _{irrig}	PG _{seq}	L _{seq}	L _{irrig}	PG _{seq}	L _{seq}	L _{irrig}	PG _{seq}
Dose de nitrogênio (kg ha ⁻¹)	40	412	447	492 b	3.074 b	4.318	5.960	79,1	78,8	78,8	36,2	32,1	36,2
	80	383	447	543 a	3.283 a	4.513	6.227	78,1	78,6	78,4	36,2	31,8	35,9
Dose de inibidor (mg kg ⁻¹)	0	390	450	533	3.095	4.395	6.027	79,3	78,8	79,4	36,4	31,9	36,0
	250	394	441	523	3.008	4.438	6.104	79,6	79,0	79,6	36,5	31,4	36,2
	500	404	425	551	3.292	4.546	6.154	78,1	78,4	78,2	36,0	32,2	36,2
	2000	403	471	464	3.321	4.283	6.089	77,0	78,7	78,2	36,0	32,3	35,9
Época de adubação	Semeadura	395	446	531	3.147	4.477	6.298	78,0	78,9	78,9	36,2	32,6 a	36,5 a
	Perfilhamento	400	448	504	3.211	4.354	5.889	79,1	78,5	78,2	36,2	31,4 b	35,6 b
Adicional vs Fatorial	Adicional	331 b	491	463	2.547 b	3.670 b	5.313 b	80,2	79,3	76,8	36,2	30,5 b	35,9
	Fatorial	398 a	447	518	3.179 a	4.415 a	6.094 a	78,5	78,7	78,6	36,2	32,0 a	36,1

⁽¹⁾Tratamento adicional = testemunha sem adubação nitrogenada. ⁽²⁾CV = coeficiente de variação. ⁽³⁾GL = graus de liberdade (nota: GL Resíduo = 32). ns, *, ** e *** = não significativo, significativo a $P \leq 0,05$, $P \leq 0,01$ e $P \leq 0,001$, respectivamente, pelo teste F. Individualmente para os fatores N ou E, médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste F.

Nota: o fator I, quando significativo, foi avaliado por meio de análise de regressão.

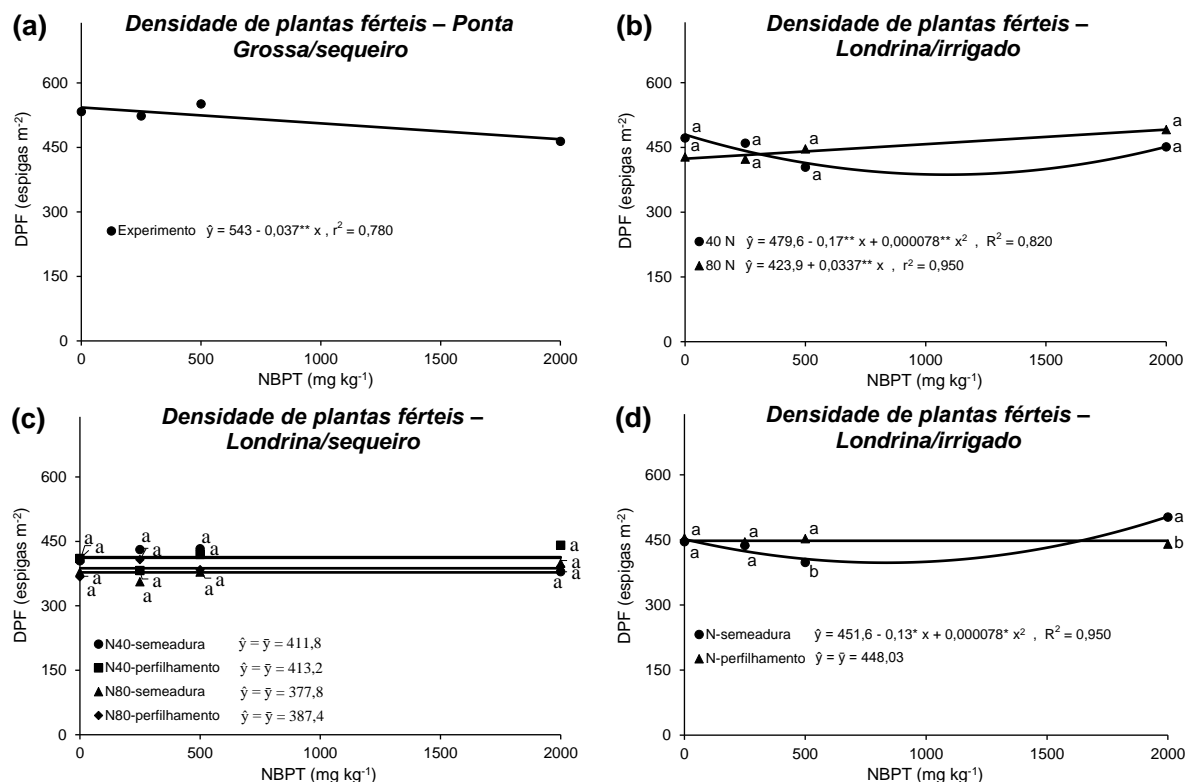


Figura 2. Desdobramento da análise de variância (ANOVA) para densidade de plantas férteis (DPF) da cultivar de trigo BRS Gralha-Azul, cultivada em três ambientes (Londrina-irrigado, Londrina-sequeiro e Ponta Grossa-sequeiro), com duas doses de N (40 e 80 kg ha⁻¹) ('b' e 'c'), na forma de ureia tratada com quatro doses de NBPT (0, 250, 500 e 2000 mg kg⁻¹), considerando duas épocas de adubação (na semeadura e no início do perfilhamento) ('c' e 'd'). Letras minúsculas comparam dois tratamentos pelo teste de Student-Newman-Keuls ($P \leq 0,05$), individualmente para cada dose de NBPT, com exceção do gráfico 'c', cujas médias foram comparadas pelo teste Tukey ($P \leq 0,05$).

Houve algumas interações entre os fatores estudados para DPF. Em L_{irrig} , a DPF aumentou linearmente com o aumento da dose de NBPT aplicado na ureia, porém, considerando apenas a dose de 80 kg ha⁻¹ de N; ao passo que na dose de 40 kg ha⁻¹ de N os efeitos do NBPT foram inconsistentes sobre a DPF (Figura 2b). No entanto, em L_{seq} não houve efeito do NBPT, independente da dose de N ou da época de adubação (Figura 2c). Além disso, considerando a época de adubação, as doses de NBPT aplicadas na ureia não influenciaram a DPF quando a adubação nitrogenada foi realizada no início do estágio de perfilhamento (GS21); porém, quando o N foi aplicado na semeadura da lavoura, o DPF diminuiu em 10,8% devido ao uso de 500 mg kg⁻¹ de NBPT, com subsequente aumento de 26,1% até a dose de 2000 mg kg⁻¹ deste inibidor de urease (Figura 2d).

O rendimento médio de grãos de trigo em L_{seq} , L_{irrig} e PG_{seq} foi de 3.142, 4.372 e 6.047 kg ha⁻¹ (Tabela 1). A adubação nitrogenada aumentou o rendimento de grãos em média de 24,8% (632 kg ha⁻¹), 20,3% (745 kg ha⁻¹) e 14,7% (781 kg ha⁻¹) em L_{seq} , L_{irrig} e PG_{seq} , respectivamente. O aumento da dose de N de 40 para 80 kg ha⁻¹ incrementou em 6,8 e 11,1% o rendimento de grãos em L_{seq} (Tabela 1) e PG_{seq} (com aplicação de N na semeadura; Tabela 2), respectivamente.

Tabela 2. Desdobramento da análise de variância (ANOVA) para a interação dose de nitrogênio (N) *versus* época de adubação, para rendimento de grãos e peso hectolítrico da cultivar de trigo BRS Gralha-Azul, cultivada em dois ambientes [Ponta Grossa–sequeiro (PG_{seq}) e Londrina–irrigado (L_{irrig})], com duas doses de N (40 e 80 kg ha⁻¹) aplicadas em duas épocas de adubação (na semeadura e no início do perfilhamento).

Época de adubação	Dose de N			
	Rendimento de grãos– PG_{seq}		Peso hectolítrico– L_{irrig}	
	(kg ha ⁻¹)		(kg hL ⁻¹)	
	40 kg ha ⁻¹	80 kg ha ⁻¹	40 kg ha ⁻¹	80 kg ha ⁻¹
Semeadura	5.966 aB	6.631 aA	78,8 aA	79,1 aA
Perfilhamento	5.954 aA	5.824 bA	78,9 aA	78,2 bB

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Student-Newman-Keuls ($P \leq 0,05$).

O NBPT apresentou efeitos positivos em L_{seq} , aumentando linearmente o rendimento de grãos, independente da dose e da época de aplicação da ureia (Figura 3). De modo geral, a época de adubação nitrogenada não influenciou o rendimento de grãos (exceto em PG_{seq} considerando apenas a dose de 80 kg ha⁻¹ de N, a favor da adubação na semeadura; Tabela 2).

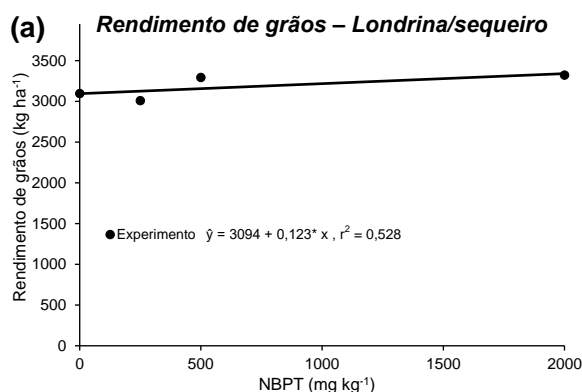


Figura 3. Rendimento de grãos da cultivar de trigo BRS Gralha-Azul, cultivada em Londrina em condição de sequeiro, adubada com ureia tratada com quatro doses de NBPT (0, 250, 500 e 2000 mg kg⁻¹).

O peso hectolítrico apresentou alta estabilidade ambiental, com médias de 78,6, 78,8 e 78,5 kg hL⁻¹ em L_{seq}, L_{irrig} e PG_{seq}, respectivamente (Tabela 1). Além disso, ele praticamente não foi influenciado pelos tratamentos (Tabelas 1 e 2).

O peso de mil grãos (PMG) apresentou médias de 36,2, 31,9 e 36,1 g em L_{seq}, L_{irrig} e PG_{seq}, respectivamente (Tabela 1). A adubação nitrogenada aumentou o PMG em média de 4,9% em L_{irrig}. Houve efeito da época de aplicação de N sobre o PMG, que foi maior em 3,8% em L_{irrig} e 2,5% em PG_{seq}, quando a adubação foi realizada na semeadura da lavoura.

A altura média de plantas foi 78,1, 87,7 e 87,6 cm em L_{seq}, L_{irrig} e PG_{seq}, respectivamente (Tabela 3). Em L_{seq} a altura de plantas aumentou em média 7,1% devido à adubação nitrogenada. Além disso, o incremento da dose de N de 40 para 80 kg ha⁻¹ proporcionou aumento de altura de planta de 4,1% em L_{seq} e 2,5% em PG_{seq}. Os efeitos das doses de NBPT e da época de adubação nitrogenada sobre a altura de plantas foram identificados apenas no desdobramento desta interação em L_{seq}, porém os resultados foram de baixa magnitude (Figura 4).

Tabela 3. Significância da análise de variância dos efeitos principais [dose de nitrogênio (DN), dose de inibidor (DI) de urease NBPT, e época de adubação (E)] e de suas interações; e médias de altura, acamamento de plantas, matéria seca da parte aérea (MSPA) e índice de colheita aparente (ICA) da cultivar de trigo BRS Gralha-Azul, cultivada em três ambientes [Londrina–irrigado (L_{irrig}), Londrina–sequeiro (L_{seq}) e Ponta Grossa–sequeiro (PG_{seq})], com duas doses de N, na forma de ureia tratada com quatro doses NBPT, considerando duas épocas de adubação.

Fonte de variação	GL ⁽³⁾	Altura de planta			Acamamento de plantas			MSPA			ICA		
		L_{seq}	L_{irrig}	PG_{seq}	L_{seq}	L_{irrig}	PG_{seq}	L_{seq}	L_{irrig}	PG_{seq}	L_{seq}	L_{irrig}	PG_{seq}
Bloco	2	ns	ns	ns	ns	ns	-	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Dose de nitrogênio (DN)	1	**	ns	*	ns	*	-	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Dose de inibidor (DI)	3	ns	ns	ns	ns	ns	-	ns	*	ns	ns	**	ns
Época de adubação (E)	1	ns	ns	ns	ns	ns	-	ns	ns	**	ns	ns	ns
DN x DI	3	ns	ns	ns	ns	ns	-	ns	***	ns	ns	**	ns
DN x E	1	ns	ns	ns	**	ns	-	ns	ns	ns	ns	ns	*
DI x E	3	*	ns	ns	ns	ns	-	ns	*	ns	ns	ns	*
DN x DI x E	3	ns	ns	ns	ns	ns	-	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Adicional vs Fatorial ⁽¹⁾	1	*	ns	ns	ns	ns	-	***	***	ns	***	ns	ns
CV (%) ⁽²⁾		4,6	5,0	4,1	3,2	2,4	-	11,6	11,2	13,6	8,4	8,7	7,7

Fator	Tratamento	Altura de planta (cm)			Acamamento de plantas (%)			MSPA (kg ha ⁻¹)			ICA (kg kg ⁻¹)		
		L_{seq}	L_{irrig}	PG_{seq}	L_{seq}	L_{irrig}	PG_{seq}	L_{seq}	L_{irrig}	PG_{seq}	L_{seq}	L_{irrig}	PG_{seq}
Dose de nitrogênio (kg ha ⁻¹)	40	80,1 a	87,0	86,5 b	91,9	97,3 b	0	6.884	7.749	8.638	0,31	0,36	0,41
	80	76,8 b	88,4	88,7 a	91,9	98,7 a	0	7.156	7.717	8.807	0,32	0,37	0,42
Dose de inibidor (mg kg ⁻¹)	0	79,3	87,3	87,7	91,2	99,2	0	6.674	8.071	8.684	0,32	0,35	0,41
	250	77,8	87,5	87,1	91,2	97,9	0	6.976	7.783	8.474	0,30	0,37	0,42
	500	78,7	88,1	87,1	93,3	97,5	0	7.390	7.097	8.720	0,31	0,40	0,42
	2000	78,0	87,7	88,5	91,7	97,5	0	7.041	7.981	9.012	0,32	0,35	0,41
Época de adubação	Semeadura	78,3	88,0	87,4	91,7	98,5	0	7.099	7.961	9.217 a	0,31	0,36	0,41
	Perfilhamento	78,6	87,4	87,7	92,1	97,5	0	6.942	7.506	8.228 b	0,32	0,37	0,42
Adicional vs Fatorial	Adicional	73,2 b	88,2	87,5	91,7	96,7	0	3.887 b	5.674 b	7.069	0,40 a	0,39	0,43
	Fatorial	78,4 a	87,7	87,6	91,9	98,0	0	7.020 a	7.733 a	8.722	0,31 b	0,37	0,41

⁽¹⁾Tratamento adicional = testemunha sem adubação nitrogenada. ⁽²⁾CV = coeficiente de variação. ⁽³⁾GL = graus de liberdade (nota: GL Resíduo = 32). ns, *, ** e *** = não significativo, significativo a $P \leq 0,05$, $P \leq 0,01$ e $P \leq 0,001$, respectivamente, pelo teste F. Individualmente para os fatores N ou E, médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste F.

Nota: o fator I, quando significativo, foi avaliado por meio de análise de regressão.

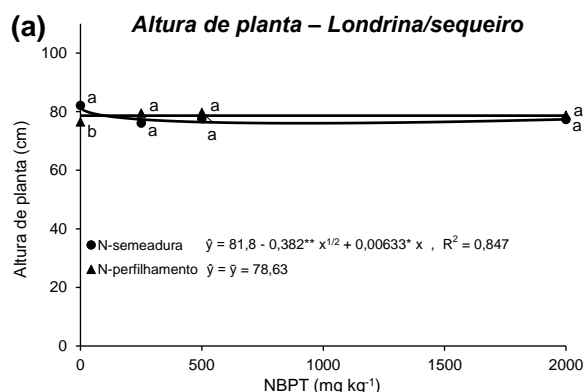


Figura 4. Desdobramento da análise de variância (ANOVA) para altura de planta da cultivar de trigo BRS Gralha-Azul, cultivada em Londrina em condição de sequeiro, com ureia tratada com quatro doses de NBPT (0, 250, 500 e 2000 mg kg⁻¹), considerando duas épocas de adubação (na semeadura e no início do perfilhamento). Letras minúsculas comparam dois tratamentos pelo teste de Student-Newman-Keuls ($P \leq 0,05$), individualmente para cada dose de NBPT.

A lavoura de trigo em Londrina apresentou elevado acamamento em todos os tratamentos, inclusive na testemunha (sem adição de N), sendo o percentual médio de plantas acamadas de 92 e 98% em condições de sequeiro e irrigação, respectivamente (Tabela 3). Neste contexto, os tratamentos praticamente não influenciaram o acamamento em Londrina, ocorrendo apenas um pequeno efeito das doses de N que elevaram em 1,4 e 2,8 pontos percentuais o acamamento em L_{irrig} (Tabela 3) e L_{seq} (Tabela 4), respectivamente. Por outro lado, em Ponta Grossa não foi registrado este dano na lavoura.

Tabela 4. Desdobramento da análise de variância (ANOVA) para a interação dose de nitrogênio (N) *versus* época de adubação, para acamamento de plantas e índice de colheita aparente (ICA) e da cultivar de trigo BRS Gralha-Azul, cultivada em dois ambientes [Londrina–sequeiro (L_{seq}) e Ponta Grossa–sequeiro (PG_{seq})], com duas doses de N (40 e 80 kg ha⁻¹) aplicadas em duas épocas de adubação (na semeadura e no início do perfilhamento).

Época de adubação	Dose de N			
	Acamamento-L _{seq}		ICA-PG _{seq}	
	(%)		(kg kg ⁻¹)	
	40 kg ha ⁻¹	80 kg ha ⁻¹	40 kg ha ⁻¹	80 kg ha ⁻¹
Semeadura	90,4 bB	92,9 aA	0,40 bA	0,42 aA
Perfilhamento	93,3 aA	90,8 aB	0,43 aA	0,41 aA

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Student-Newman-Keuls ($P \leq 0,05$).

A produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) das plantas no estágio de florescimento foi afetada pelo ambiente, apresentando médias de 6.836, 7.612 e 8.525 kg ha⁻¹ em L_{seq}, L_{irrig} e PG_{seq}, respectivamente (Tabela 3). Esta característica foi fortemente influenciada pela adubação nitrogenada, que aumentou a MSPA em média de 80,6% em L_{seq} e 36,3% em L_{irrig}, porém, sem efeito significativo em PG_{seq}. A época de realização da adubação nitrogenada influenciou a MSPA, com vantagem para a adição de N na semeadura da lavoura, que aumentou em 12% a produção desta biomassa em PG_{seq} (Tabela 3) e 21% em L_{irrig} (considerando apenas a dose 2000 mg kg⁻¹ de NBPT; Figura 5a). As doses de N e de NBPT afetaram a MSPA em algumas situações, cujos efeitos são observados nos desdobramentos de interações entre fatores avaliados. Assim, em L_{irrig} o incremento de 40 para 80 kg ha⁻¹ de N aumentou a MSPA em 18 e 27%, considerando apenas as doses de NBPT de 250 e 500 mg kg⁻¹, respectivamente (Figura 5b). Por outro lado, também em L_{irrig}, o aumento da dose de NBPT de 0 para 500 mg kg⁻¹ reduziu a MSPA em 26% com a aplicação de 40 kg ha⁻¹ de N (Figura 5b), e em 20% quando a adubação foi realizada na semeadura da lavoura (Figura 5a).

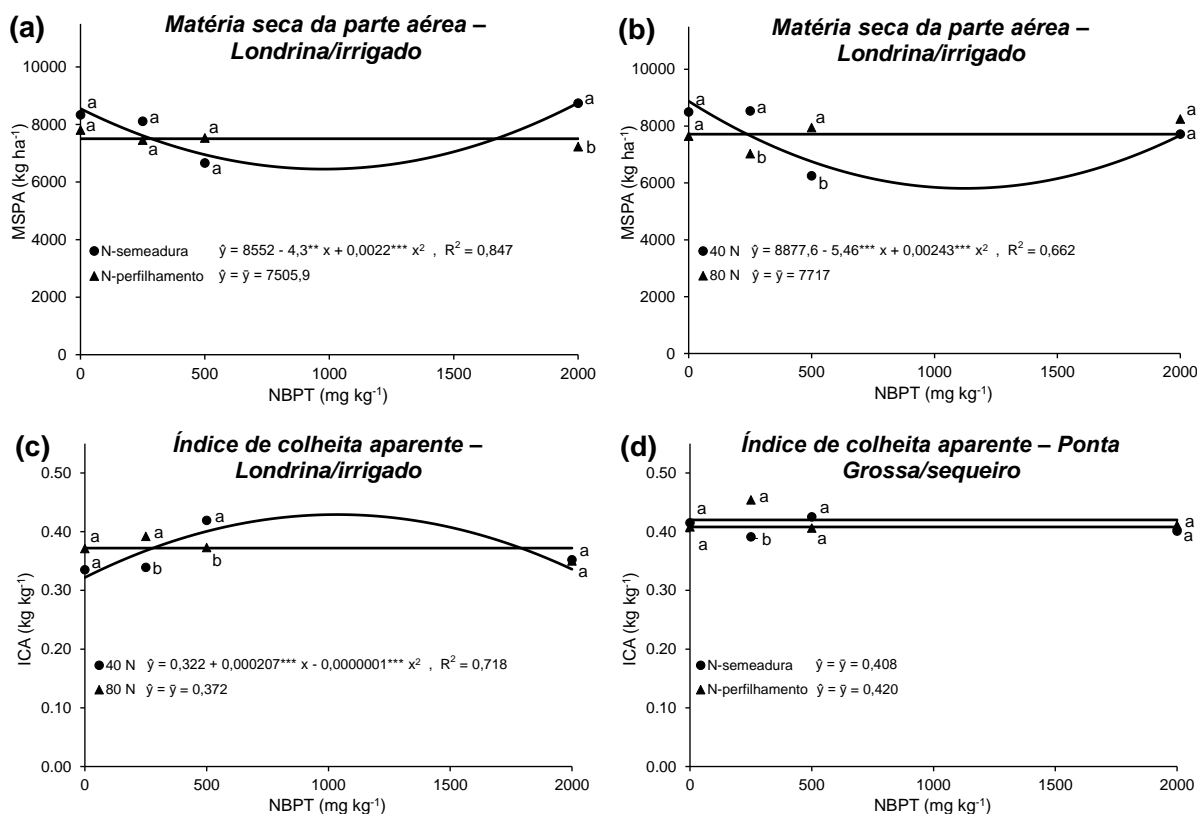


Figura 5. Desdobramento da análise de variância (ANOVA) para matéria seca da parte aérea (MSPA) e índice de colheita aparente (ICA) da cultivar de trigo BRS Gralha-Azul, cultivada em dois ambientes (Londrina–irrigado e Ponta Grossa–sequeiro), com duas doses de N (40 e 80 kg ha⁻¹) ('b' e 'c'), na forma de ureia tratada com quatro doses de NBPT (0, 250, 500 e 2000 mg kg⁻¹), considerando duas épocas de adubação (na semeadura e no início do perfilhamento) ('a' e 'd'). Letras minúsculas comparam dois tratamentos pelo teste de Student-Newman-Keuls ($P \leq 0,05$), individualmente para cada dose de NBPT.

O índice de colheita aparente (ICA) apresentou médias de 0,318, 0,368 e 0,415 em L_{seq}, L_{irrig} e PG_{seq}, respectivamente (Tabela 3). Ele foi reduzido em média de 22,5% em L_{seq} devido à adubação nitrogenada. O ICA não foi consistentemente afetado pelas doses de N (Tabela 4 e Figura 5c) ou pelas doses de NBPT (Figuras 5c e 5d) ou pelas épocas de adubação nitrogenada (Tabela 4 e Figura 5d).

4.3.3. Absorção e eficiência de utilização de nitrogênio pelas plantas de trigo

O teor de N na MSPA foi favorecido pela disponibilidade hídrica, alcançando as médias de 14,1, 16 e 16,4 em L_{seq} , L_{irrig} e PG_{seq} , respectivamente (Tabela 5). A adubação nitrogenada aumentou este teor de N em média de 13,6% em L_{seq} , em comparação à testemunha sem adição de N. O aumento da dose de N de 40 para 80 kg ha⁻¹ elevou o teor de N na MSPA em 6,5% em L_{irrig} e 5,7% e PG_{seq} . A aplicação de N no estágio de perfilhamento proporcionou maior teor de N do que sua aplicação na semeadura, sendo maior em 7,3% em L_{seq} , 7,1% em L_{irrig} (Tabela 5) e 12,2% em PG_{seq} (somente nos tratamentos com 0 e 250 mg kg⁻¹ de NBPT; Figura 6a). As doses de NBPT praticamente não influenciaram o teor de N (exceto em PG_{seq} quando a ureia foi aplicada na semeadura; Figura 6a).

O conteúdo de N na MSPA também foi maior em ambientes com maior oferta hídrica, a julgar pelos valores médios de 97, 121 e 141 kg ha⁻¹ em L_{seq} , L_{irrig} e PG_{seq} , respectivamente (Tabela 5). A adubação com N aumentou o conteúdo de N na MSPA em média de 104% em L_{seq} e 41,4% em L_{irrig} . Somente em algumas situações específicas em L_{irrig} foram observados efeitos de doses de N, doses de NBPT e época de adubação sobre esta variável. Assim, o aumento da dose de N de 40 para 80 kg ha⁻¹ aumentou o conteúdo de N na MSPA em média de 21% nos tratamentos com 500 e 2000 mg kg⁻¹ de NBPT (Figura 6b). Por sua vez, o aumento da dose de NBPT de 500 para 2000 mg kg⁻¹ aumentou o conteúdo de N em 15% nos tratamentos com 40 kg ha⁻¹ de N (Figura 6b) e em 28% quando a adubação foi realizada na semeadura da lavoura (Figura 6c). Por outro lado, efeito contrário foi obtido pelo aumento da dose de NBPT de 0 para 500 mg kg⁻¹, ocorrendo redução média do conteúdo de N na MSPA de 21,5%, considerando tratamentos com 40 kg ha⁻¹ N (Figura 6b) ou com adubação na semeadura (Figura 6c). Finalmente, o conteúdo de N foi 23% maior quando a adubação foi realizada no estágio de perfilhamento (em relação à adição de N na semeadura), o que ficou restrito ao tratamento com 500 mg kg⁻¹ de NBPT (Figura 6c).

Tabela 5. Significância da análise de variância dos efeitos principais [dose de nitrogênio (DN), dose de inibidor (DI) de urease NBPT, e época de adubação (E)] e de suas interações; e médias de teor e conteúdo de nitrogênio (N) na matéria seca da parte aérea (MSPA) no estágio de florescimento, e eficiências de utilização de N (EUN) para produção de MSPA e para rendimento de grãos (RG) da cultivar de trigo BRS Gralha-Azul, cultivada em três ambientes [Londrina–irrigado (L_{irrig}), Londrina–sequeiro (L_{seq}) e Ponta Grossa–sequeiro (PG_{seq})], com duas doses de N, na forma de ureia tratada com quatro doses NBPT, considerando duas épocas de adubação.

Fonte de variação	GL ⁽³⁾	Teor de N na MSPA			Conteúdo de N na MSPA			EUN para MSPA			EUN para RG		
		L_{seq}	L_{irrig}	PG_{seq}	L_{seq}	L_{irrig}	PG_{seq}	L_{seq}	L_{irrig}	PG_{seq}	L_{seq}	L_{irrig}	PG_{seq}
Bloco	2	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Dose de nitrogênio (DN)	1	ns	***	**	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Dose de inibidor (DI)	3	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns
Época de adubação (E)	1	**	***	**	ns	ns	ns	**	**	***	ns	ns	ns
DN x DI	3	ns	ns	ns	ns	***	ns	*	***	ns	ns	*	ns
DN x E	1	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
DI x E	3	ns	ns	***	ns	**	ns	ns	*	**	ns	ns	ns
DN x DI x E	3	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns
Adicional vs Fatorial ⁽¹⁾	1	*	ns	ns	***	***	ns	***	*	**	***	ns	ns
CV (%) ⁽²⁾		8,5	6,1	6,3	16,7	10,2	14,5	11,9	14,9	15,8	17,0	13,1	15,0

Fator	Tratamento	Teor de N na MSPA (g kg ⁻¹)			Conteúdo de N na MSPA (kg ha ⁻¹)			EUN para MSPA (kg ² g ⁻¹ ha ⁻¹)			EUN para RG (kg kg ⁻¹)		
		L_{seq}	L_{irrig}	PG_{seq}	L_{seq}	L_{irrig}	PG_{seq}	L_{seq}	L_{irrig}	PG_{seq}	L_{seq}	L_{irrig}	PG_{seq}
Dose de nitrogênio (kg ha ⁻¹)	40	14,0	15,5 b	15,9 b	96	120	137	497	504	547	32,3	36,8	44,5
	80	14,3	16,5 a	16,8 a	103	127	147	502	471	530	32,6	36,2	43,0
Dose de inibidor (mg kg ⁻¹)	0	13,9	16,0	16,2	93	128	140	482	509	542	33,6	34,4	44,2
	250	14,0	15,8	16,1	97	122	135	504	497	536	31,4	36,7	45,8
	500	13,9	16,3	16,8	102	115	146	537	440	522	32,6	41,0	42,6
	2000	14,9	16,1	16,3	105	128	147	474	505	555	32,2	33,9	42,5
Época de adubação	Semeadura	13,7 b	15,5 b	15,9	97	122	146	522	521	585	33,0	37,4	43,8
	Perfilhamento	14,7 a	16,6 a	16,8	102	124	138	476	455	493	31,9	35,5	43,8
Adicional vs Fatorial	Adicional	12,5 b	15,3	17,5	49 b	87 b	124	310 b	372 b	404 b	53,1 a	42,3	43,2
	Fatorial	14,2 a	16,0	16,3	100 a	123 a	142	499 a	488 a	539 a	32,5 b	36,5	43,8

⁽¹⁾Tratamento adicional = testemunha sem adubação nitrogenada. ⁽²⁾CV = coeficiente de variação. ⁽³⁾GL = graus de liberdade (nota: GL Resíduo = 32). ns, *, ** e *** = não significativo, significativo a $P \leq 0,05$, $P \leq 0,01$ e $P \leq 0,001$, respectivamente, pelo teste F. Individualmente para os fatores N ou E, médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste F. Nota: o fator I, quando significativo, foi avaliado por meio de análise de regressão.

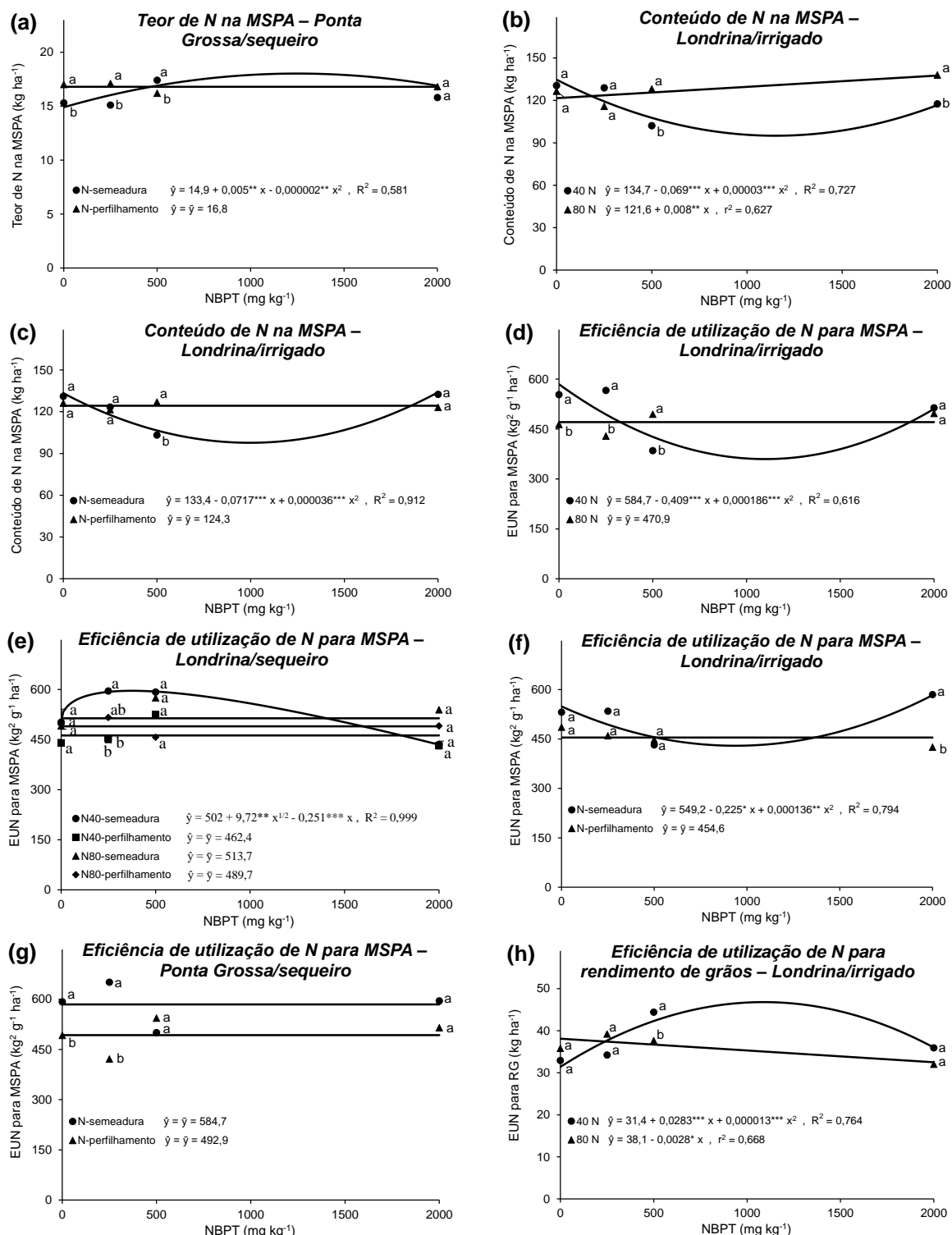


Figure 6. Desdobramento da análise de variância para teor de N (a) e conteúdo de N ('b' e 'c') na MSPA, eficiências de utilização de N (EUN) para produção de matéria seca da parte aérea MSPA no estágio de florescimento (gráficos 'd-g') e para rendimento de grãos (h), da cultivar de trigo BRS Galha-Azul, cultivada em três ambientes (Londrina-irrigado, Londrina-sequeiro e Ponta Grossa-sequeiro), com duas doses de N (40 e 80 kg ha⁻¹), na forma de ureia tratada com quatro doses de NBPT (0, 250, 500 e 2000 mg kg⁻¹), considerando duas épocas de adubação (na semeadura e no início do perfilhamento). Letras minúsculas comparam dois tratamentos pelo teste de Student-Newman-Keuls ($P \leq 0,05$), individualmente para cada dose de NBPT, com exceção do gráfico 'e', cujas médias foram comparadas pelo teste Tukey ($P \leq 0,05$).

A EUN para produção de MSPA (EUN_{MSPA}) apresentou médias de 488, 481 e 531 $kg^2 g^{-1} ha^{-1}$ em L_{seq} , L_{irrig} e PG_{seq} , respectivamente (Tabela 5). A adubação nitrogenada aumentou a EUN_{MSPA} em média de 61, 31 e 33% em L_{seq} , L_{irrig} e PG_{seq} , em comparação à testemunha sem adição de N (Tabela 5). O aumento da dose de N de 40 para 80 $kg ha^{-1}$ reduziu em média de 20% a EUN_{MSPA} em L_{irrig} nos tratamentos com 0 e 250 $mg kg^{-1}$ de NBPT, porém, houve efeito contrário no tratamento com 500 $mg kg^{-1}$ de NBPT (Figura 6d). Os efeitos do aumento da dose de NBPT sobre a EUN_{MSPA} foram inconsistentes e infrequentes (Figuras 6d, 6e, 6f e 6g). A aplicação de N durante a semeadura da lavoura aumentou a EUN_{MSPA} em média de 32% (somente para tratamentos com 250 $mg kg^{-1}$ de NBPT; Figura 6e), 38% (somente para tratamentos com 2000 $mg kg^{-1}$ de NBPT; Figura 6f) e 37% (somente para tratamentos com 0 e 250 $mg kg^{-1}$ de NBPT; Figura 6g) em L_{seq} , L_{irrig} e PG_{seq} , respectivamente, em comparação à adubação realizada no início do perfilhamento das plantas.

A EUN para rendimento de grãos (EUN_{RG}) teve médias de 34, 37 e 44 $kg kg^{-1}$ em L_{seq} , L_{irrig} e PG_{seq} , respectivamente (Tabela 5). Em L_{seq} ela foi reduzida em média de 39% pela adubação nitrogenada. A EUN_{RG} não foi influenciada por doses de N (exceto no tratamento com 500 $mg kg^{-1}$ de NBPT; Figura 6h) ou pela época de realização da adubação nitrogenada. Além disso, somente em algumas situações específicas o aumento da dose de NBPT influenciou a EUN_{RG} , no entanto os resultados foram inconsistentes, com casos de aumento e de redução da EUN_{RG} (Figura 6h).

4.4. DISCUSSÃO

4.4.1. Influência das condições ambientais sobre a cultura do trigo

As condições ambientais (principalmente a disponibilidade hídrica) foram determinantes do desenvolvimento vegetativo e da produtividade da cultura do trigo. Assim, a suplementação hídrica (pela irrigação) em Londrina aumentou a DPF que contribuiu para o acréscimo de 39% (1.230 $kg ha^{-1}$) no rendimento de grãos. Em uma análise mais ampla dos ambientes, comparando as condições de sequeiro de Londrina (L_{seq}) e de Ponta Grossa (PG_{seq}), verificamos que o menor déficit hídrico e a temperatura mais amena de PG_{seq} contribuíram para incrementos da DPF e de 92,5% (2.905 $kg ha^{-1}$) de rendimento de grãos. Estes resultados podem ser parcialmente atribuídos ao maior acúmulo de N na MSPA das plantas cultivadas nos ambientes com maior disponibilidade hídrica. De fato, o transporte de N no solo na forma de NH_4^+ e NO_3^- ocorre predominantemente por fluxo de massa, que

depende do movimento de água em direção às raízes e da taxa de transpiração das plantas (MCMURTRIE e NÄSHOLM, 2018). Portanto, como a maior absorção de N favorece o perfilhamento das plantas de trigo (YOUSAF et al., 2014), isto resultou em maior DPF e rendimento de grãos em PG_{seq} e L_{irrig} , comparados a L_{seq} .

O maior déficit hídrico em L_{seq} reduziu em média de 12% a altura das plantas, em relação aos outros dois ambientes. Isto se deve à redução do alongamento do colmo em L_{seq} , cujo estágio fenológico foi marcado por baixa precipitação. A divisão e o alongamento celular dependem do turgor hídrico (ZUBAIROVA et al., 2016) e da biossíntese do ácido giberélico (TAIZ et al., 2017), que são prejudicados pela redução da disponibilidade de água no solo (NELISSEN et al., 2018). Por outro lado, a redução da altura das plantas em L_{seq} desfavoreceu o acamamento, pois colmos mais curtos são geralmente mais resistentes ao dobramento e à quebra (PIÑERA-CHAVES et al., 2016).

O acamamento de plantas foi elevado em L_{seq} e L_{irrig} , porém, ele foi nulo em PG_{seq} . Os principais fatores responsáveis pelo acamamento são a susceptibilidade genética, maior disponibilidade de N, alta disponibilidade de água no solo, maior altura de plantas, ventos de alta intensidade, colmos estruturalmente mais fracos e elevada carga de grãos (FOLONI et al., 2014; MA et al., 2016; KHAN et al., 2020; PEAKE et al., 2020). Considerando que os materiais genéticos cultivados foram idênticos nos três ambientes, que as rajadas mais intensas de vento foram maiores em Ponta Grossa ($42,5 \text{ m s}^{-1}$ no 111º dia do ciclo) do que em Londrina (15 m s^{-1} no 111º dia do ciclo), o rendimento (carga) de grãos e a quantidade de N absorvido pelas plantas foram maiores em PG_{seq} e disponibilidade hídrica foi menor em L_{seq} , podemos deduzir que a ausência de acamamento em PG_{seq} está relacionada à maior resistência estrutural do colmo das plantas. Khan et al. (2020) relatam que colmos com maior teor de lignina são mais resistentes ao acamamento. Por sua vez, Zhang et al. (2017) verificaram que colmos com maior densidade ou acúmulo de matéria seca por unidade de comprimento proporcionam maior resistência física e estrutural a esse tecido vegetal. Portanto, nós hipotetizamos que a combinação de fatores ambientais (solo, clima, etc.) em PG_{seq} favoreceu a formação de colmos mais resistentes. Porém, análises químicas, físicas e morfológicas do colmo não foram realizadas no presente trabalho e precisam ser melhor investigadas.

A produção média da MSPA foi maior em L_{irrig} e PG_{seq} , ambientes com maior disponibilidade hídrica, em comparação a L_{seq} . No entanto, a magnitude de incremento de MSPA nestes locais foi proporcionalmente menor do que de rendimento de grãos, o que resultou em ICA maior em 16% em L_{irrig} e 30,5% em PG_{seq} , comparados a L_{seq} . Segundo Campoy *et al.* (2020), a produção de MSPA depende da quantidade total de água utilizada

pela planta durante o ciclo da cultura, enquanto o ICA depende da proporção de água usada depois da antese. Por outro lado, a maior proporção de MSPA em PG_{seq} pode ter contribuído para a formação de colmos mais densos e resistentes ao acamamento, como discutido anteriormente.

A maior oferta hídrica em L_{irrig} e PG_{seq} favoreceram a absorção de N. Assim, o teor de N na MSPA no estágio de florescimento foi maior em 13,5% em L_{irrig} e 16% em PG_{seq} , comparados a L_{seq} . Estes valores combinados às respectivas produções de biomassa resultaram em incrementos médios de conteúdo de N na MSPA de 25,5% em L_{irrig} e 46% em PG_{seq} . Considerando que o teor e o acúmulo de N no tecido vegetal apresentam alta correlação com a atividade fotossintética (ZHONG et al., 2018), isto explica parcialmente os maiores rendimentos de grãos e MSPA nos ambientes com maior disponibilidade de água no solo.

A EUN_{MSPA} foi pouco influenciada pela condição ambiental, indicando que o N absorvido foi proporcionalmente convertido em MSPA nos três ambientes, sendo um pouco menor (9%) em PG_{seq} . Por outro lado, a EUN_{RG} foi maior em 30% em PG_{seq} e 9% em L_{irrig} , comparados a L_{seq} . Isto demonstra que a planta apresentou mecanismos eficientes para converter em grãos o maior conteúdo de N absorvido em PG_{seq} , ou seja, a suposta ocorrência de 'consumo de luxo' não se confirmou.

4.4.2. Efeitos da adubação nitrogenada na cultura do trigo

A adubação nitrogenada foi eficiente em aumentar o rendimento de grãos e a produção de MSPA nos três ambientes, sendo que o incremento de grãos por unidade de N adicionado foi proporcionalmente menor do que o incremento de MSPA, ou seja, 19 e 41%, respectivamente. Considerando que a dose média de N foi de 60 kg ha^{-1} e que o conteúdo médio de N acumulado na MSPA no florescimento foi de 121 kg ha^{-1} nos tratamentos que receberam adubação nitrogenada e 87 kg ha^{-1} no tratamento testemunha (sem adição de N), verificamos que o N nativo do solo contribuiu com aproximadamente 61 e 87 kg ha^{-1} de N, respectivamente. Neste contexto, depreende-se que o N proveniente do solo (por meio da mineralização da matéria orgânica do solo e da decomposição da palhada de soja) foi quase suficiente para atender as exigências da cultura por N para produção de grãos. Por outro lado, a produção de MSPA apresentou maior resposta ao N adicional. Outra dedução importante é a aparente maior eficiência de extração de N do solo por plantas não fertilizadas (aproximadamente 26 kg ha^{-1} de N, ou seja, 43% maior). Segundo Wang et al. (2014), em solos com baixa disponibilidade de N as plantas alocam maior proporção de fotoassimilados

para formação do sistema radicular, de modo a explorar maior volume de solo para aquisição do nutriente, principalmente em condições com maior disponibilidade de água.

Houve maior incremento percentual de rendimento de grãos (24,8%) e de MSPA (80,6%) em L_{seq} (ambiente com menor oferta hídrica) em resposta à adubação nitrogenada. Isto está associado ao fenômeno de decréscimo da disponibilidade de N no solo induzida por déficit hídrico (MCMURTRIE e NÄSHOLM, 2018; PARAJULI et al. 2018). Assim, a adubação nitrogenada aumentou a concentração de N na solução do solo, permitindo maior absorção de N (nas formas de NH_4^+ e NO_3^-) pelo processo de fluxo de massa, por unidade de água absorvida. Além disso, verifica-se que as plantas cultivadas no tratamento testemunha (sem adição de N) absorveram e translocaram menos N para MSPA em L_{seq} (49 kg ha^{-1}) comparado a L_{irrig} (87 kg ha^{-1}) e PG_{seq} (124 kg ha^{-1}). Isto reflete a menor disponibilidade de N no solo de L_{seq} e, conseqüentemente, a maior magnitude de resposta à adubação nitrogenada. Além disso, o aumento do N absorvido pelas plantas, em resposta à adição de N via fertilizante, aumentou o teor de N na MSPA, a altura de planta e a DPF somente em L_{seq} , ou seja, a baixa disponibilidade de N estava limitando o crescimento e o perfilhamento das plantas somente neste ambiente, situação adversa que foi parcialmente contornada pelo suprimento de N via adubação nitrogenada. Finalmente, somente em L_{seq} o fornecimento de N influenciou o ICA, reduzindo-o, devido ao proporcional maior incremento de MSPA em relação ao incremento de rendimento de grãos, como discutido anteriormente (tópico 4.4.1).

A adubação nitrogenada aumentou a EUN_{MSPA} nos três ambientes, com maior incremento em L_{seq} (61%) em relação a L_{irrig} e PG_{seq} (média de 32%). Além disso, ela reduziu a EUN_{RG} somente em L_{seq} . Esses resultados reforçam a discussão anterior, ou seja, quanto maior a restrição hídrica maior é a responsividade relativa (percentual) da cultura do trigo à adição de N via fertilizante. Considerando que a absorção de NH_4^+ e NO_3^- é gradualmente reduzida pelo aumento do déficit de água no solo—pois o transporte destes íons por fluxo de massa depende do conteúdo volumétrico de água no solo e da transpiração da cultura (SRIVASTAVA et al., 2020)—a alternativa mais viável para aumentar a absorção de N pelas plantas em condições de sequeiro é aumentar a concentração de N na solução do solo, ou seja, por meio da adubação nitrogenada.

4.4.3. Manejo de doses de N e de NBPT e épocas de adubação e na cultura do trigo

O manejo de N na cultura do trigo combinou doses de N, doses do inibidor de urease NBPT e épocas de adubação. Os resultados foram influenciados pelas condições ambientais,

que serão consideradas ao longo da discussão para melhor compreensão dos efeitos dos tratamentos.

O aumento da dose de N de 40 para 80 kg ha⁻¹ aumentou a DPF em PG_{seq}, o rendimento de grãos em L_{seq} e PG_{seq} (com N aplicado na semeadura), o acamamento de plantas em L_{irrig} e L_{seq} (com N aplicado na semeadura), a MSPA em L_{irrig} (com 500 mg kg⁻¹ de NBPT), o ICA em L_{irrig} (com 250 mg kg⁻¹ de NBPT), o teor de N na MSPA em L_{irrig} e PG_{seq}, o conteúdo de N na MSPA em L_{irrig} (com 500 ou 2000 mg kg⁻¹ de NBPT) e a EUN_{MSPA} em L_{irrig} (com 500 mg kg⁻¹ de NBPT). Por outro lado, houve redução da EUN_{MSPA} em L_{irrig} (com 0 ou 250 mg kg⁻¹ de NBPT) e da EUN_{RG} em L_{irrig} (junto com 500 mg kg⁻¹ de NBPT). Portanto, os resultados mais consistentes foram obtidos para DPF, rendimento de grãos e teor de N na MSPA, principalmente para o ambiente de PG_{seq}. Para as demais avaliações, houve ampla variedade de interações e/ou de efeitos isolados do aumento da dose de N para condições específicas, frequentemente associadas com a dose de 500 mg kg⁻¹ de NBPT em L_{irrig}.

Baseado na discussão anterior, verificamos que a adição de 40 kg ha⁻¹ de N foi quase suficiente para suprir (em complemento ao N nativo do solo e da palhada) as demandas nutricionais por N das plantas, principalmente em L_{irrig}. Provavelmente as condições ambientais (baixo déficit hídrico e temperaturas amenas) favoreceram a atividade microbiana na mineralização da matéria orgânica do solo e na decomposição da palhada da soja, permitindo ao N nativo do solo contribuir com quantidade significativa de N mineral para absorção pelas plantas, como discutido anteriormente (tópico 4.4.2). Por outro lado, a despeito de não ter aumentado o rendimento de grãos em L_{irrig}, o aumento da dose de N associado a 500 mg kg⁻¹ de NBPT proporcionou incremento da MSPA, conteúdo de N na MSPA e EUN_{MSPA}, além de redução da EUN_{RG}. Isto pode ser atribuído à efetividade do inibidor de urease em reduzir a volatilização de NH₃ nesta situação de maior oferta hídrica, permitindo às plantas incrementar a absorção de N no período seguinte à adubação nitrogenada com ureia.

Em PG_{seq} (ambiente mais frio) a atividade microbiana do solo tende a ser menor em relação aos outros ambientes, portanto, é esperado maiores respostas das plantas ao aumento da dose de N. Assim, o aumento da DPF foi resultado do aumento do perfilhamento das plantas devido ao fornecimento adicional de N (de 40 para 80 kg ha⁻¹), corroborando achados de outros pesquisadores com a cultura do trigo (SHIRAZI et al., 2014; YANG et al., 2019). Este aumento da DPF (10,4%) contribuiu para o aumento do rendimento de grãos (6,8%), pois o número espigas m⁻² é um dos principais componentes de rendimento do trigo (ZHANG et al., 2020).

O inibidor de urease NBPT apresentou efeitos inconsistentes e infrequentes nos três ambientes de cultivo do trigo. Por exemplo, em PG_{seq} o aumento das doses de NBPT de 0–2000 mg kg⁻¹ resultou em decréscimo de até 13% da DPF. Este resultado não era esperado e não encontramos na literatura registros de achados similares. Por outro lado, em L_{irrig} (considerando somente a dose 80 kg ha⁻¹ de N) houve aumento linear de até 14,8% da DPF e de até 8,6% do conteúdo de N na MSPA com o aumento da dose de NBPT aplicado na ureia, o que faz sentido, pois a redução da volatilização de NH₃ (devido ao NBPT) resultou em maior disponibilidade de N para as plantas e, conseqüentemente, aumento do perfilhamento e de espigas férteis, como discutido anteriormente (tópico 4.4.1). Neste contexto, somente em L_{seq} houve aumento linear do rendimento de grãos (de até 7,3%) em resposta ao aumento da dose de NBPT que, neste caso, não aumentou a DPF. As demais características avaliadas não responderam de forma consistente ao tratamento da ureia com doses de NBPT, cujos efeitos foram geralmente contraditórios (comparando a faixa de 0–500 com 500–2000 mg kg⁻¹ de NBPT) e observados apenas nos desdobramentos das interações dos fatores estudados.

A adição de NBPT à ureia nem sempre aumenta o rendimento das culturas agrícolas, mesmo quando a sua utilização implica em reduções de perdas de N por volatilização de NH₃. Isso ocorre principalmente quando as condições ambientais naturalmente diminuem as perdas de NH₃ e favorecem a absorção do N pelas plantas (PERIN et al., 2020; WALLACE et al., 2020). Neste contexto, a umidade do solo é um fator determinante da eficiência da adubação nitrogenada, sendo que a volatilização de NH₃ ocorre em maior intensidade quando a ureia é aplicada em solo úmido, seguido por um período sem precipitação (PERIN et al., 2020). Experimentos de campo realizados por Santos et al. (2020) demonstraram que a aplicação superficial de ureia na dose de 150 kg ha⁻¹ de N em solo úmido e sem subsequente ocorrência de chuva ou irrigação, proporcionou pico de volatilização de NH₃ no segundo dia após a aplicação do fertilizante, com perda de 27 kg ha⁻¹ de N-NH₃, cujo valor foi maior do que o obtido com a aplicação de ureia em solo seco seguido por chuva, onde a maior perda de N (10 kg ha⁻¹ de N-NH₃) ocorreu no terceiro dia após a adubação.

A ocorrência de chuvas em Londrina nos dias subsequentes à adubação nitrogenada em cobertura (no início do perfilhamento das plantas) incorporaram a ureia ao solo, reduzindo a esperada efetividade do NBPT sobre a ureia, e sua influência no rendimento de grãos.

Em PG_{seq} , a adubação nitrogenada ocorreu em condições de menor temperatura e baixa umidade, sendo que chuvas significativas (>5 mm) ocorreram somente no 12º e no 11º dia após as adubações realizadas no sulco de semeadura ou em cobertura no início do perfilhamento, respectivamente. Assim, a ação inibitória do NBPT sobre a urease teve pouca

oportunidade de se expressar, pois estas condições ambientais desfavoreceram a atividade da urease. Neste sentido, Longo e Melo (2005) analisando a atividade da urease em ambientes cultivados com culturas anuais (soja e milho) e perenes (eucalipto, pinus e citros), observaram maior hidrólise da ureia nos meses mais quentes e úmidos, independente da cultura instalada.

A aplicação da ureia no sulco de semeadura reduz as perdas de N por volatilização de NH_3 (TASCA et al., 2011), pois aumenta o contato do fertilizante com o solo, favorecendo a adsorção do NH_4^+ (formado a partir da hidrólise da ureia) às cargas negativas do solo (SANGOI et al., 2003). Neste contexto, em Londrina a adubação de semeadura foi realizada com solo seco e temperatura e umidade relativa do ar razoavelmente baixas, condições que desfavorecem a volatilização de NH_3 . Portanto, essa combinação de fatores reduziu a intensidade dos efeitos do NBPT nos primeiros dias após a semeadura. Além disso, em L_{irrig} a ausência de efeitos do NBPT sobre o rendimento de grãos pode ser parcialmente explicada pelo fornecimento de 25 mm de água de irrigação no 5º dia após a semeadura, quantidade suficiente para solubilizar e incorporar a ureia ao solo em maior profundidade, mantendo-a melhor protegida da atividade da urease, que está presente em maior quantidade na superfície do solo, associada aos resíduos orgânicos (LANNA et al., 2010). Por outro lado, em Londrina houve um aumento gradativo da temperatura e da umidade relativa do ar a partir do 3º dia após a semeadura, condição que favorece a atividade da urease. Desta forma, no ambiente de L_{seq} a adição de NBPT teve maior possibilidade de expressar sua ação de inibição da urease, retardando o pico de volatilização até a ocorrência da primeira chuva (no 9º dia após a semeadura), resultando em melhor aproveitamento do N pela planta de trigo e no incremento de rendimento de grãos.

Woodley et al. (2020), em experimento de campo com três anos de aplicação de ureia em superfície ou incorporada, observaram perdas médias acumuladas de 23 e 14 kg ha⁻¹ de N- NH_3 , respectivamente, demonstrando que a incorporação da ureia ao solo reduz o processo de volatilização, mas não o elimina. Eles também demonstraram que o tratamento combinando os inibidores de urease e de nitrificação foi eficaz em mitigar a quantidade de NH_3 volatilizada, mesmo quando a ureia foi incorporada, porém isso não resultou em incremento de rendimento de grãos de milho.

A volatilização de NH_3 é geralmente maior em locais com maior quantidade de resíduos vegetais, pH mais elevado (PERIN et al., 2020), textura arenosa (LI et al., 2020) e menor CTC do solo (MENCARONI et al., 2021). Neste contexto, em Londrina a área experimental possuía 4.550 kg ha⁻¹ de palhada de soja, e o solo tinha pH de 5,4, textura argilosa (732 g kg⁻¹ de argila) e CTC de 11,7 cmol_c dm⁻³. Por sua vez, em Ponta Grossa havia

5.870 kg ha⁻¹ de palhada de soja, e solo com pH 4,7, textura média (526 g kg⁻¹ de argila) e CTC de 10 cmolc dm⁻³. Desta forma, em Ponta Grossa a maior quantidade de palhada e a textura média favoreceram a ação da enzima e o pH ácido a desfavoreceu. Por outro lado, em Londrina a ação da enzima foi beneficiada pela significativa quantidade de palhada. Porém, a intensidade da atividade da urease depende da combinação de vários fatores associados a condições meteorológicas, qualidade e quantidade de resíduos orgânicos, dentre outros. Assim, é difícil prever qual ambiente será mais susceptível a perdas de N por volatilização de NH₃, dificultando a recomendação de uso do inibidor de urease.

Além disso, é preciso considerar os efeitos das condições ambientais (principalmente solo, temperatura e umidade) sobre a eficiência e/ou degradação do NBPT. Por exemplo, em solos com pH mais ácido a inibição da urease proporcionada pelo NBPT tende a ser menor, pois o inibidor se degrada mais rápido sob condição de acidez do que de alcalinidade (SUNDERLAGE e COOK, 2018). Engel et al. (2015), em experimento com solo não esterilizado, demonstraram que a concentração do NBPT um dia após sua aplicação foi reduzida em até 98,6% quando o pH do solo era de 5,1; enquanto que em pH 7,3 esta redução foi de 28,4%. Os autores demonstraram ainda que o decréscimo de uma unidade de pH pode reduzir em até 10 vezes a meia vida do NBPT.

Com base nestas informações, podemos esperar efeitos mais consistentes do NBPT em faixa de pH mais alcalino, ou seja, que também favorece a atividade da urease. Assim, considerando o pH do solo de Londrina (5,4) e de Ponta Grossa (4,7), verificamos que tanto a atividade da urease como a efetividade do NBPT são desfavorecidos, o que explica parcialmente os resultados obtidos no presente trabalho.

Lasisi et al. (2020) relatam que a obtenção de maior rendimento de grãos de trigo e de melhor EUN estão mais relacionadas às condições ambientais (como a disponibilidade hídrica e o tipo de solo) do que ao uso do NBPT adicionado à ureia, pois a quantidade de N preservada pelo uso deste inibidor de urease pode ser relativamente pequena quando comparada à quantidade de N presente no solo (proveniente da mineralização) e/ou fornecida pela fertilização.

Neste contexto, é preciso considerar também outras práticas de manejo agrônomo menos onerosas do que o uso de NBPT para mitigar a volatilização de NH₃, como por exemplo aumentar a profundidade de incorporação da ureia no solo, e realizar a adubação nitrogenada de cobertura no momento de maior demanda por N da lavoura, sempre considerando as condições de umidade e temperatura antes de realizar a adubação.

A época de aplicação de N foi o terceiro fator estudado no manejo da adubação nitrogenada da cultura do trigo. De um modo geral, o suprimento de ureia no sulco de semeadura foi mais efetivo do que à adubação de cobertura no estágio de início do perfilhamento, a despeito de ter influenciado o rendimento de grãos (aumento de 14%) somente em PG_{seq} (considerando apenas a dose de 80 kg ha⁻¹ de N). Assim, a adubação na semeadura proporcionou incrementos de PMG (em L_{irrig} e PG_{seq}), altura de planta (L_{seq} com 0 mg kg⁻¹ de NBPT), acamamento (L_{seq} com 40 kg ha⁻¹ de N), MSPA (PG_{seq}), EUN_{MSPA} (L_{irrig} com 2000 mg kg⁻¹ de NBPT; PG_{seq} com 0 e 250 mg kg⁻¹ de NBPT). Por outro lado, a adubação nitrogenada em cobertura no perfilhamento incrementou o ICA (PG_{seq} com 40 kg ha⁻¹ de N), teor de N na MSPA (L_{seq}; L_{irrig}; e PG_{seq} com 0 ou 250 mg kg⁻¹ de NBPT) e conteúdo de N na MSPA (L_{irrig} com 500 mg kg⁻¹ de NBPT).

O momento ideal de realização da adubação nitrogenada da cultura do trigo ainda não é consenso entre os pesquisadores e produtores rurais. Há trabalhos que sustentam que a melhor estratégia é aplicar parte do N na semeadura da lavoura e o restante do N em cobertura, em dose única ou parcelada (FOLONI et al., 2016; ZHONG et al., 2018; CBPTT, 2020; SI et al., 2020). Outras pesquisas mostraram maiores rendimentos de grãos de trigo quando a adubação nitrogenada é realizada em cobertura (parcelada ou em dose única) em estádios fenológicos a partir do início do perfilhamento das plantas (SHIRAZI et al., 2014; SI et al., 2020). Porém, de acordo com nossas pesquisas bibliográficas não há trabalhos demonstrando vantagens da adubação nitrogenada exclusiva no momento da semeadura sobre o incremento do rendimento de grãos da lavoura de trigo.

Em condições de solos com maior teor de argila e com alta CTC, as perdas de NO₃⁻ por lixiviação são de menor magnitude, principalmente em ambientes onde a irrigação é manejada de forma a evitar excedentes hídricos (SUN et al., 2021) ou as precipitações são baixas. Além disso, em solos mais ácidos (pH ≤ 5,0) as perdas de N por volatilização de NH₃ são reduzidas (LIU et al., 2018). Assim, para as condições ambientais de Londrina e Ponta Grossa as perdas de N durante a estação de crescimento do trigo (139 e 141 dias, respectivamente) provavelmente foram de baixa intensidade. Assim, a adubação nitrogenada na semeadura disponibilizou N para as plantas por maior período, uma vez que a adubação em cobertura aconteceu 34 e 28 dias após a semeadura em Londrina e Ponta Grossa, respectivamente. Isto permitiu às plantas maior aproveitamento do N aplicado via fertilizante, principalmente nos estádios iniciais de crescimento, ou seja, durante o estabelecimento do estande de plantas.

A adubação nitrogenada mais tardia (a partir do estágio de perfilhamento) também pode ter vantagens. Por exemplo, o aumento do teor e do conteúdo de N na MSPA no estágio de florescimento podem promover aumento do teor de N nos grãos, mesmo que não aumente o rendimento de grãos (LOLLATO et al., 2021). Portanto, isto seria economicamente importante para o agricultor se fosse pago uma bonificação por trigo com maior teor de glúten. Além disso, em solos mais susceptíveis às perdas de N por lixiviação ou volatilização, ou seja, mais arenosos, de baixa CTC e com pH alcalino, a aplicação de fertilizantes em cobertura e em maior número de parcelamentos permite melhor sincronia entre a oferta de N no solo e a demanda de N pelas plantas nos diversos estádios fenológicos (LIU et al., 2019), porém resulta em aumento de custo devido ao maior número de operações.

4.5. CONCLUSÕES

A fertilização nitrogenada e o manejo do NBPT devem considerar as características de cada ambiente (como pH, textura, temperatura e umidade do solo) durante a estação de crescimento do trigo.

A dose de N pode ser reduzida em ambientes subtropicais favoráveis à mineralização da matéria orgânica do solo e com grande quantidade de palhada de soja, uma vez que o N nativo derivado do sistema solo-cobertura vegetal pode fornecer parte do N requerido pela cultura do trigo.

O inibidor de urease NBPT não é eficiente em condições de solo ácido associadas à maior disponibilidade hídrica.

A fertilização nitrogenada realizada exclusivamente na época da semeadura pode ser suficiente para suprir a necessidade de N da cultura do trigo, além de reduzir os custos operacionais ao excluir a fertilização em cobertura.

4.6. REFERÊNCIAS

ABALOS D.; SANZ-COBENA A.; MISSELBROOK T.; VALLEJO A. Effectiveness of urease inhibition on the abatement of ammonia, nitrous oxide and nitric oxide emissions in a non-irrigated Mediterranean barley field. **Chemosphere**, Amsterdam v. 89, p.310–318, 2012.

ALHAMEID, A.; SINGH, J.; SEKARAN, U.; KUMAR, S. Soil biological health: influence of crop rotational diversity and tillage on soil microbial properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 83, p.1431–1442, 2019.

BARBERENA, I. M.; ESPINDULA, M. C.; ARAÚJO, L. F. B.; MARCOLAN, A. L. Use of urease inhibitors to reduce ammonia volatilization in Amazonian soils. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 54, e00253, 2019.

BASSOI, M. C.; FOLONI, J. S. S. **Cultivar de trigo BRS Gralha-Azul: características e desempenho agrônômico**. Embrapa. Londrina, 2015. (Comunicado Técnico, 82).

BENETT, C. G. S.; BUZZETTI, S.; SILVA, K. S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; ANDREOTTI, M.; ARF, O. Aplicação foliar e em cobertura de nitrogênio na cultura do trigo no cerrado. **Semina-Ciências Agrárias**, Londrina, v. 32, p. 829–838, 2011.

BHATTACHARYYA, R.; DAS, T. K.; DAS, S.; DEY, A.; PATRA, A. K.; AGNIHOTRI, R.; GHOSH, A. I.; SHARMA, A. R. Four years of conservation agriculture affects topsoil aggregate-associated 15nitrogen but not the 15nitrogen use efficiency by wheat in a semi-arid climate. **Geoderma**, Amsterdam, v. 337, p. 333–340, 2018.

CAMPOY, J.; CAMPOS, I.; PLAZA, C.; CALERA, M.; BODAS, V.; CALERA, A. Estimation of harvest index in wheat crops using a remote sensing-based approach. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 256, 107910, 2020.

CANTARELLA, H.; MARCELINO, R. Fontes alternativas de nitrogênio para a cultura do milho. In: Abdalla SRS, Prochnow LI, Fancelli AL, editors. **Informações Agrônômicas**, n. 122. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2008. p. 12–14.

CHEN, X. X.; ZHANG, W.; LIANG, X. Y.; LIU, Y. M.; XU, S. J.; ZHAO, Q. Y.; DU, Y. F.; ZHANG, L.; CHEN, X. P.; ZOU, C. Q. Physiological and developmental traits associated with the grain yield of winter wheat as affected by phosphorus fertilizer management. **Scientific Reports**, London, v. 9, 16580. 2019.

WANG, C.; LIU, W.; LI, Q.; MA, D.; LU, H.; FENG, W.; XIE, Y.; ZHU, Y. GUO, T. Effects of different irrigation and nitrogen regimes on root growth and its correlation with above-ground plant parts in high-yielding wheat under field conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 169, p. 138–149, 2014.

COHAN, J. P.; SOUDER, C. L.; GUICHERD, C.; LORGEOU, J.; DU CHEYRON, P.; BONNEFOY, M.; DECARRIER, A.; PIRAUX, F.; LAURENT, F. Combining breeding traits and agronomic indicators to characterize the impact of cultivar on the nitrogen use efficiency of bread wheat. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 242, 107588, 2019.

COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE — CBPTT. **Informações técnicas para trigo e triticale - safra 2016**. Passo Fundo: Embrapa, 2016.

COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE — CBPTT. **Informações técnicas para trigo e triticale - safra 2020**. Passo Fundo: Biotrigo Genética, 2020.

COMPANHIA NACIONAL DO ABASTECIMENTO — CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. Brasília: CONAB, 2020a. Disponível em <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em 12/05/2020

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Trigo – Análise mensal – Junho/2020**. Brasília: Conab, 2020b. 6 p.

DONALD, C. M; HAMBLIN, J. The biological yield and harvest index of cereals as agronomic and plant breeding criteria. **Advances in Agronomy**, Amsterdam v. 28, p.361 – 405, 1976.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA — EMBRAPA. **Desenvolvimento de cultivares de feijão-caupi adaptadas às regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste**. Teresina: Embrapa Meio Norte, 2009.

ENGEL, R. E.; TOWEY, B. D.; GRAVENS, E. Degradation of the urease inhibitor NBPT as affected by soil pH. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 79, p. 1674–1683, 2015.

ESPINDULA, M. C.; ROCHA, V. S.; SOUZA, M. A.; GROSSI, J. A. S.; SOUZA, L. T. Doses e formas de aplicação de nitrogênio no desenvolvimento e produção da cultura do trigo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, p. 1404 – 1411, 2010.

EUCLYDES, R. F. **Manual de utilização do programa SAEG (Sistema para Análises Estatísticas e Genéticas)**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1997.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI. P. P.; NOGUEIRA. D. A. Experimental designs: um pacote R para análise de experimentos. **Revista da Estatística da Universidade Federal de Ouro Preto**, Ouro Preto, v. 1, p. 1 - 9, 2011.

FOLONI, J. S. S.; BASSOI, M. C.; OLIVEIRA JUNIOR, A.; CASTRO C. **Fontes e doses de nitrogênio na adubação de semeadura do trigo no Paraná**. Londrina: Embrapa, 2014 (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 8).

FOLONI, J. S. S.; BASSOI, M. C.; SILVA, S. R. **Indicações fitotécnicas para cultivares de trigo da Embrapa no Paraná**. Londrina: Embrapa Soja, 2016. 23 p. (Circular técnica, 117).

FRANCO, J. A. M.; SARAIVA NETTO. A. Produção de fertilizantes nitrogenados e suprimento de matéria prima. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S.; VITTI, G. C. (Org.). **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2007. p. 73–107.

FRAZÃO, J. J.; SILVA, A. R.; SILVA, V. L.; OLIVEIRA, V. A.; CORRÊA, R. S. Fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada e ureia na cultura do milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande v. 18, p. 1262 – 1267, 2014.

KANDELER, E.; GERBER, H. Short-term assay of soil urease activity using colorimetric determination of ammonium. **Biology and Fertility of Soils**, New York, v. 6, p. 68–72, 1988.

KHAN, A.; AHMAD, A.; ALI, W.; HUSSAIN, S.; AJAYO, B. S.; RAZA, M. A.; KAMRAN, M.; TE, X.; AL AMIN, N.; ALI, S.; IQBAL, N.; KHAN, I.; SATTAR, M. T.; ALI, A.; WU, Y.; YANG, W. Optimization of plant density and nitrogen regimes to mitigate lodging risk in wheat. **Agronomy Journal**, Madison, v. 112, p. 2535–2551, 2020.

LANA, R. M. Q.; PEREIRA, V. J.; LEITE, C. N.; TEIXEIRA, G. M.; GOMES, J. S.; CAMARGO, R. NBPT (urease inhibitor) in the dynamics of ammonia volatilization. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 13, n. 2, e5538, 2018.

LANNA, A. C.; SILVEIRA, P. M.; SILVA, M. B.; FERRARESI, T. M.; KLIEMANN, H. J. Atividade de urease no solo com feijoeiro influenciada pela cobertura vegetal e sistemas de plantio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1933–1939, 2010.

LARA CABEZAS, W. A. R.; KORNDORFER, G. H.; MOTTA, A. S. Volatilização de N-NH₃ na cultura de milho: I. efeito da irrigação e substituição parcial da ureia por sulfato de amônio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 481–487, 1997.

LASISI, A. A.; AKINREMI, O. O.; KUMARAGAMAGE, D. Efficiency of fall versus spring applied urea-based fertilizers treated with urease and nitrification inhibitors II. Crop yield and nitrogen use efficiency. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, 0361-5995, 2020.

LI, C.; WANG, Y.; LI, Y.; ZHU, L.; CAO, Y.; ZHAO, X.; FENG, G.; GAO, Q. Mixture of controlled-release and normal urea to improve nitrogen management for maize across contrasting soil types. **Agronomy Journal**, Madison, v. 112, p. 3101–3113, 2020.

LIU, Q.; ZHANG, Y.; LIU, B.; AMONETTE, J. E.; LIN, Z.; LIU, G.; AMBUS, P.; XIE, Z. How does biochar influence soil N cycle? A meta-analysis. **Plant Soil**, New York, v. 426, p. 211–225, 2018.

LIU, Z.; GAO, F.; LIU, Y.; YANG, J.; ZHEN, X.; LI, X.; LI, Y.; ZHAO, J. LI, J.; QIAN, B.; YANG, D.; LI, X. Timing and splitting of nitrogen fertilizer supply to increase crop yield and efficiency of nitrogen utilization in a wheat–peanut relay intercropping system in China. **The Crop Journal**, Amsterdam, v. 7, p. 101–112, 2019.

LOLLATO, R. P.; JAENISCH, B. R.; SILVA, S. R. Genotype-specific nitrogen uptake dynamics and fertilizer management explain contrasting wheat protein concentration. **Crop Science**, Hoboken, v. 61, p. csc2.20442, 2021.

LONGO, R. M.; MELO, W. J. Atividade da urease em latossolos sob influência da cobertura vegetal e da época de amostragem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 645–650, 2005.

MA, S.; DUAN, A.; MA, S.; YANG, S. Effect of early-stage regulated deficit irrigation on stem lodging resistance, leaf photosynthesis, root respiration and yield stability of winter wheat under post-anthesis water stress conditions. **Irrigation and Drainage**, Hoboken, v. 65, p. 673–681, 2016.

MCMURTRIE, R. E.; NÄSHOLM, T. Quantifying the contribution of mass flow to nitrogen acquisition by an individual plant root. **New Phytologist**, Hoboken, v. 218, p. 119–130, 2018.

MENCARONI, M.; DAL FERRO, N.; FURLANETTO, J.; LONGO, M.; LAZZARO, B.; SARTORI, L.; GRANT, B. B.; SMITH, W. N.; MORARI, F. Identifying N fertilizer management strategies to reduce ammonia volatilization: Towards a site-specific approach. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 227, 111445, 2021.

NELISSEN, H.; SUN, X-H.; RYMER, B.; JIKUMARU, Y.; KOJIMA, M.; TAKEBAYASHI, Y.; ABBELOOS, R.; DEMUYNCK, K.; STORME, V.; VUYLSTEKE, M.; DE BLOCK, J.; HERMAN, D.; COPPENS, F.; MAERE, S.; KAMIYA, Y.; SAKAKIBARA, H.; BEEMSTER, G. T. S.; INZÉ, D. The reduction in maize leaf growth under mild drought affects the transition between cell division and cell expansion and cannot be restored by elevated gibberellic acid levels. **Plant Biotechnology Journal**, Hoboken, v. 16, p. 615–627, 2018.

NITSCHKE, P. R.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. S.; PINTO, L. F. D. **Atlas climático do Estado do Paraná**. Londrina: Instituto Agrônômico do Paraná, 2019.

OLIVEIRA, J. A.; STAFANATO, J. B.; GOULART, R. S.; ZONTA, E.; LIMA, E.; MAZUR, N.; PEREIRA, C. G.; SOUZA, H. N.; COSTA, F. G. M. Volatilização de amônia proveniente de ureia compactada com enxofre e bentonita, em ambiente controlado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 1558–1564, 2014.

PARAJULI, S., OJHA, B. R., & FERRARA, G. O. Quantification of secondary traits for drought and low nitrogen stress tolerance in inbreds and hybrids of maize (*Zea mays* L.). **Journal of Plant Genetics and Breeding**, Hyderabad, v. 2, n. 1, 106, 2018.

PEAKE, A. S.; BELL, K. L.; FISCHER, R. A.; GARDNER, M.; DAS, B. T.; POOLE, N.; MUMFORD, M. Cultivar × management interaction to reduce lodging and improve grain yield of irrigated spring wheat: optimising plant growth regulator use, N application timing, row spacing and sowing date. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 11, 401, 2020.

PERIN, V.; SANTOS, E. A.; LOLLATO, R.; RUIZ-DIAZ, D.; KLUITENBERG, G. J. Impacts of ammonia volatilization from broadcast urea on winter wheat production. **Agronomy Journal**, Madison, v. 112, p. 3758–3772, 2020.

PIÑERA-CHAVES, F. J.; BERRY, P. M.; FOULKES, M. J.; JESSON, M. A.; REYNOLDS, M. P. Avoiding lodging in irrigated spring wheat. I. Stem and root structural requirements. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 196, p. 325 – 336, 2016.

R CORE TEAM (2020). **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. Available online at <https://www.R-project.org/>

RAWLUK, C. D. L.; GRANT, C. A.; RACZ, G. J. Ammonia volatilization from soils fertilized with urea and varying rates of urease inhibitor NBPT. **Canadian Journal of Soil Science**, Canadá, v. 81, p. 239–246, 2001

SALA, V. M. R.; FREITAS, S. S.; DONZELI, V. P.; FREITAS, J. G.; GALLO, P. B.; SILVEIRA, A. P. D. Ocorrência e efeito de bactérias diazotróficas em genótipos de trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 345–352, 2005.

SANGOI, L.; ERNANI, P. R.; LECH, V. A.; RAMPAZZO, C. Volatilização de N-NH₃ em decorrência da forma de aplicação de ureia, manejo de resíduos e tipo de solo, em laboratório. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 4, p. 687–692, 2003.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; Oliveira, J. B. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3 ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2013.

SANTOS, W. M.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; PACHECO, E. P.; BARROS, I.; FERNANDES, M. F.; BATISTA, J. N.; BENDER, E. P.; SOUZA, H. N., JANTALIA, C. P. Ammonia volatilization and yield of corn fertilized with different nitrogen sources in the Brazilian semiarid. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.55, e01036, 2020.

SCHEEREN, P. L.; CASTRO, R. L.; CAIERÃO, E. Botânica, morfologia e descrição fenotípica. In: BORÉM, A.; SCHEEREN, P. L. **Trigo: do plantio à colheita**. Viçosa: Editora UFV, 2015. p. 35–55.

SHIRAZI, S. M.; YUSOP, Z.; ZARDARI, N. H.; ISMAIL, Z. Effect of irrigation regimes and nitrogen levels on the growth and yield of wheat. **Advances in Agriculture**, London, v. 2014, 250874, p. 6, 2014.

SI, Z.; ZAIN, M.; MEHMOOD, F.; WANG, G.; GAO, Y.; DUAN, A. Effects of nitrogen application rate and irrigation regime on growth, yield, and water-nitrogen use efficiency of drip-irrigated winter wheat in the North China Plain. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 231, 106002, 2020.

SIBALDELLI, R. N. R.; FARIAS, J. R. B. **Boletim agrometeorológico da Embrapa Soja, Londrina, PR - 2018**. Londrina: Embrapa Soja, 2019.

SIDDIQI, M, Y.; GLASS, A. D. M. Utilization index: A modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, London, v. 4, n. 3, p. 289–302, 1981.

SILVA, A. G. B.; SEQUEIRA, C. H.; SERMARINI, R. A.; OTTO, R. Urease inhibitor NBPT on ammonia volatilization and crop productivity: A meta-analysis. **Agronomy Journal**, Madison, v. 109, p. 1–13, 2017.

SRIVASTAVA, R. K.; PANDA, R. K.; CHAKRABORTY, A.; HALDER, D. Quantitative estimation of water use efficiency and evapotranspiration under varying nitrogen levels and sowing dates for rainfed and irrigated maize. **Theoretical and Applied Climatology**, New York, v. 139, p. 1385 – 1400, 2020.

SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA E DO ABASTECIMENTO DO PARANÁ — SEAB. **Custos de Produção**. Curitiba: SEAB, 2020. Disponível em: <http://www.agricultura.pr.gov.br/CustosProducao>. Acesso em: 10/05/2020.

SINCLAIR, T. R.; RUFTY, T. W. Nitrogen and water resources commonly limit crop yield increases, not necessarily plant genetics. **Global Food Security**, Amsterdam, v. 1, n. 2, p. 94 – 98, 2012.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy**. 12. ed. Washington: USDA-Natural Resources Conservation Service, 2014. 360 p.

SUN, H.; KOPP, K.; CARDON, G.; JONES, S. Numerical simulation of water and nitrogen transport in three turfgrass systems. **International Turfgrass Society Research Journal**, Hoboken, 2021. (Accepted author manuscript)

SUNDERLAGE, B.; COOK, R. L. Soil property and fertilizer additive effects on ammonia volatilization from urea. **Soil Science Society of America Journal**, Hoboken, v. 82, p. 253–259, 2018.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858 p.

TASCA, F. A.; ERNANI, P. R.; ROGERI, D. A.; GATIBONI, L. C.; CASSOL, P. C. Volatilização de amônia no solo após aplicação de ureia convencional ou com inibidor de urease. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 493–502, 2011.

TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; TARSITANO, M. A. A.; BUZETTI, S.; BERTOLIN, D. C.; COLOMBO, A. S.; NASCIMENTO, V. Análise econômica da adubação nitrogenada em trigo irrigado sob plantio direto no cerrado. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 57, n. 4, p. 446–453, 2010.

WALLACE, A. J.; ARMSTRONG, R. D.; GRACE, P. R.; SCHEER, C.; PARTINGTON, D. L. Nitrogen use efficiency of ¹⁵N urea applied to wheat based on fertiliser timing and use of inhibitors. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, New York, v. 116, p. 41–56, 2020.

WOODLEY, A. L.; DRURY, C. F.; YANG, X. Y.; PHILLIPS, L. A.; REYNOLDS, W. D.; CALDER, W.; OLOYA, T. O. Ammonia volatilization, nitrous oxide emissions, and corn

yields as influenced by nitrogen placement and enhanced efficiency fertilizers. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 84, p. 1327–1341, 2020.

YANG, D.; CAI, T.; LU, Y.; WANG, Z. Optimizing plant density and nitrogen application to manipulate tiller growth and increase grain yield and nitrogen-use efficiency in winter wheat. **PeerJ**, London, v. 7, e6484, 2019.

YOUSAF, M.; SHAABAN, M.; ALI, S. A. I.; FAHAD, S.; KHAN, M. J.; WANG, Y.; SHAH, A. N.; SABIEL, S. A. I.; OSMAN, K. A. The effect of nitrogen application rates and timings of first irrigation on wheat growth and yield. **International Journal of Agriculture Innovations and Research**, Bhopal, v. 2, n. 4, p. 645–653, 2014.

ZADOKS, J. C.; CHANG, T. T.; KONZAK, C. F. A. A decimal code for the growth stages of cereals. **Weed Research**, Hoboken, v. 14, p. 415 – 421, 1974.

ZHANG, L.; HE, X.; LIANG, Z.; ZHANG, W.; ZOU, C.; CHEN, X. Tiller development affected by nitrogen fertilization in a high-yielding wheat production system. **Crop Science**, Hoboken, v. 60, n. 2, p. 1–14, 2020.

ZHANG, M.; WANG, H.; YI, Y.; DING, J.; ZHU, M.; LI, C.; GUO, W.; FENG, C.; ZHU, X. Effect of nitrogen levels and nitrogen ratios on lodging resistance and yield potential of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). **PLoS One**, San Francisco, v. 12, n. 11, e0187543, 2017.

ZHONG, C.; CAO, X.; BAI, Z.; ZHANG, J.; ZHU, L.; HUANG, J.; JIN, Q. Nitrogen metabolism correlates with the acclimation of photosynthesis to short-term water stress in rice (*Oryza sativa* L.). **Plant Physiology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 125, p. 52–62, 2018.

ZUBAIROVA, U.; NIKOLAEV, S.; PENENKO, A. PODKOLODNYI, N.; GOLUSHKO, S.; AFONNIKOV, D.; KOLCHANOV, N. Mechanical behavior of cells within a cell-based model of wheat leaf growth. **Frontiers in Plant Science**, München, v. 7, 1878, 2016.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sucesso no manejo da fertilização nitrogenada está relacionado a um conjunto de variáveis que devem ser observadas por técnicos e por produtores agrícolas.

A escolha do fertilizante deve considerar o custo por unidade de N e a otimização dos processos que envolvem a adubação, como o transporte e o armazenamento, sem deixar de realizar as práticas de adubação que minimizam as perdas por volatilização e os possíveis danos à cultura, tanto na adubação de base como naquela de cobertura.

Além disso, as características físico-químicas do solo e as condições climáticas estão fortemente associadas à eficiência da adubação nitrogenada (independente da fonte do fertilizante), bem como à eficiência de aditivos (como o NBPT adicionado à ureia) capazes de mitigar as perdas de N por volatilização.

Devido à complexidade da dinâmica do N no solo, a recomendação da adubação nitrogenada deve ser realizada de forma específica, a fim de otimizar o aproveitamento dos fertilizantes, reduzindo os custos e os impactos ambientais.